

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E ESTRUTURAS

FABIANI PEREIRA FRANZEN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO DE VEDAÇÕES VERTICAIS
EXTERNAS EXECUTADAS EM LIGHT STEEL FRAMING**

CURITIBA

2015

FABIANI PEREIRA FRANZEN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO DE VEDAÇÕES VERTICAIS
EXTERNAS EXECUTADAS EM LIGHT STEEL FRAME**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre, área de concentração Materiais e Estruturas.

Orientador:

Professor Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda

Coorientador:

Professor Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

CURITIBA

2015

F837a

Franzen, Fabiani Pereira

Análise do desempenho térmico e acústico de vedações verticais externas executadas em light steel frame/ Fabiani Pereira Franzen. – Curitiba, 2015.
141 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Leonardo Fagundes Rosemback Miranda – Co-orientador:
Márcio Henrique de Avelar Gomes.

Bibliografia: p. 136-141.

1. Aço - Estruturas. 2. Arquitetura - Aquecimento e ventilação. 3.
Arquitetura acústica. 4. Reciclagem de materiais. 5. Isolamento. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Miranda, Leonardo Fagundes
Rosemback. III. Gomes, Márcio Henrique de Avelar. IV. Título.

CDD: 697

TERMO DE APROVAÇÃO

FABIANI PEREIRA FRANZEN

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO DE VEDAÇÕES VERTICAIS EXTERNAS EXECUTADAS EM LIGHT STEEL FRAMING

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós- Graduação em Engenharia da Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e estruturas, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Leonardo F. R. Miranda
Professor Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda

Coorientador: M. H. A. Gomes
Professor Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

Examinador : Christian S. Strobel
Professor Dr. Christian Scapulatempo Strobel

Examinador : Marcelo Henrique F. de Medeiros
Professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Curitiba, 20 de janeiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e em especial a todos os membros do PPGECC pela oportunidade de crescimento humano e científico.

Ao meu orientador prof. Dr. Leonardo Miranda que sempre disposto, firme, competente e construtivo me permitiu a oportunidade de enriquecimento acadêmico e pessoal. Sua orientação, dedicação e comprometimento me mantiveram no foco em momentos decisivos.

Ao meu coorientador Márcio Avelar Gomes pela disponibilidade, suporte, contribuição acadêmica e empréstimo de seus equipamentos acústicos. Agradeço ainda por ser um facilitador disponibilizando equipamentos acústicos de propriedade do DAMEC/UTFPR e por orientar e adequar seu aluno de graduação na época, e agora, engenheiro Pedro Gabriel de Moura Prestes, que também agradeço imensamente, na execução dos ensaios acústicos.

Ao prof. Dr. Alexandre Augusto Pescador Sardá coordenador do Laboratório de Vibrações e Ruído do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR que gentilmente cedeu o espaço do laboratório e por ser o facilitador de todo o processo de execução dos ensaios acústicos.

Ao engenheiro Guilherme Alberto Cardoso, que na época do desenvolvimento da dissertação era graduando e participava do programa PIBITI/CNPq juntamente com o prof. Dr. Leonardo Miranda pelo auxílio na execução dos ensaios térmicos.

À prof. Danniella Rosa, mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, professora do curso técnico em mecânica do Instituto Federal do Paraná pelo empréstimo da Câmera termográfica utilizada nos ensaios térmicos.

À Ziza, pela eficiência, dedicação e paciência na servidoria pública e com os mestrandos.

Aos colegas mestrandos, pelo apoio, incentivo, risadas, troca de experiência, companheirismo e amizade.

Aos membros da banca, professor Dr. Christian Scapulatempo Strobel e o professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros pela dedicação, incentivo e contribuições.

Aos meus pais, Gilberto Franzen e Suelci Franzen e em especial, ao meu filho Thiago Franzen Sebrão, amor da minha vida, pela compreensão, ajuda, amizade e amor incondicional a mim dedicado.

O pensar é para o homem, o que é o voar para os pássaros.

Albert Einstein

RESUMO

FRANZEN, F.P. Análise do desempenho térmico e acústico das vedações verticais executadas em light steel framing. 2015. 205f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2015.

A construção civil no Brasil necessita de uma reformulação para atender a crescimento populacional. Uma alternativa é a utilização de tecnologias com características industrializadas como o “light steel framing” (LSF) que é um sistema aberto, modular, de rápida execução, fácil manutenção e sustentável. Com a vigência da norma de desempenho, a NBR 15575 (ABNT, 2013), nasce uma necessidade de ciência sobre o desempenho dos sistemas. Materiais com características sustentáveis e de menor custo precisam ser avaliados de forma a contribuir para o avanço sustentável do LSF no Brasil, então o objetivo é avaliar o desempenho de alternativas para as vedações verticais externas em LSF com relação ao seu desempenho térmico e acústico visando menor custo e sustentabilidade. Os painéis possuem elementos constantes e variáveis como os isolantes e as massas para acabamento. Foram testados produtos industrializados, resíduo industrial, gesso acartonado moído e em pedaços (resíduo da construção) e materiais utilizados em outros sistemas construtivos. O desempenho térmico foi analisado segundo o procedimento 1A Simplificado - NBR 15575 (ABNT, 2013) e experimento onde comparou-se a diferença de temperatura com a medição da face interna enquanto que uma fonte de calor manteve a temperatura da face externa em 80°C por 60 minutos. O desempenho acústico foi analisado utilizando o método da função de transferência, já que os materiais reciclados não possuem índices para incrementar os cálculos ou simulações nos dois casos. Os resultados obtidos foram analisados pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP) que determinou qual é o melhor painel. Quando o desempenho térmico é considerado o critério de maior importância, os painéis com acabamento na face externa (estruque sintético), massa látex PVA na parte interna e no interior do painel fibra cerâmica obtiveram o melhor desempenho. Para o desempenho acústico, o painel com lã de vidro no miolo obteve o melhor desempenho e quando o critério de maior relevância é o custo, os painéis com o interior preenchido com materiais reciclados obtiveram o menor valor.

Palavras chave: light steel framing, desempenho térmico, desempenho acústico, materiais reciclados, reciclagem de materiais e materiais para isolamento,

ABSTRACT

FRANZEN, F.P. Analysis of thermal and acoustic performance of vertical panels executed in light steel framing. 2015. 205f. Thesis (MA) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2015.

Civil construction in Brazil needs a reformulation to attend the population growth. One of the options is the use of technologies with industrialized characteristics, such as "light steel frame"(LSF) which is an open system, modular, of fast execution, easy maintenance and sustainable. With the legality of the law performance, the NBR 15575(ABNT, 2013), the need of a study over the system's performance is born. Covering, isolation and finishing with sustainable characteristics and of low cost need to be appraised in a way to contribute to the sustainable advance of LSF in Brazil, therefore the goal is to evaluate the alternatives of performance for external vertical sealing in LSF with regards to its thermal performance and acoustic looking for low cost and sustainability. The frames have constant elements and changeable, like insulating materials and finishing batters. Were tested industrialized products such as glass wool and rock wool, ceramic fiber(industrial residue), crushed wall plaster(drywall) and in pieces(construction residues) and the acoustic stripe. the thermal performance was analysed according to procedure 1 A Simplified - NBR 15575 (ABNT, 2013) and the experiment, as well the acoustic performance that used the transfer function method, since the recycled materials do not have contents to increase the calculations or simulations. Were realized in sites with easy control of climate variables. In the thermal experiment measurements were done in one face, while the other source of heat kept the temperature from the opposite face in 80 C (176 F) for 60 minutes. The obtained results were analyzed by the Analytic Hierarchy (A.H.P.) that settled which is the best panel. When thermal performance is considered the criterion of biggest importance, the panels with synthetic stucco on the external face, PVA latex on the internal part and in the core ceramic fiber, obtained the best performance. For the acoustic performance, the panel with glass wool in the core obtained the best performance and when the criterion of relevancy is cost, the filled core panels with recycled material had the lowest cost.

Key words: light steel frame, thermal performance, acoustic performance, recycled material to LSF and filling of the panel core.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de LSF sem os revestimentos, isolamento e acabamento. Fonte: SFA, 2008.	9
Figura 2: Anúncio publicitário para o Good Housekeeping Stran-Steel House (1933). Fonte: Brian Carter, War, Design and Weapons, (NJ, Princeton Architectural Press, 2005).	18
Figura 3: Produção de painéis estruturais em LSF. Fonte: Article R.W. Lawson e Odgen (2008).	19
Figura 4: Instalação de um módulo no Edifício Murray Grove. Londres, 1999. Fonte: Lawson e Odgen (2008).	19
Figura 5: Energia operacional. Diminuição anual do consumo de combustível devido a melhorias com a redução por aquecimento mecânico. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	26
Figura 6: Emissões de gases de efeito estufa e energia associados a construção de sistemas estruturais alternativos. Fonte: Cole (1998).	29
Figura 7: Módulo de quatro lados (composição escalonada). Executora Ayrshire Framing.	32
Figura 8: Módulos parcialmente abertos – Executoras Futureform e Ayrshire Framing. Fonte: Lawson (2012).	32
Figura 9: Instalação de módulos abertos para um hospital. Executora Yorkon. Fonte: Lawson (2012).	33
Figura 10: Instalação de módulos apoiados no quadro de aço. Executoras Yorkon e Joule. Fonte: Lawson (2012).	33
Figura 11: Edifício Nuffield Hospital, Inglaterra. Fonte: METSEC, 2011.	34
Figura 12: Imagem de uma parede de vedação embutida. Fonte: MetSec (2011).	35
Figura 13: Edificação industrial com estrutura principal de concreto e painéis embutidos de LSF. Espaçamento de 60cm entre eixos. Pinhais/Pr. Fonte: Autor.	35
Figura 14: Travamento superior com bloqueadores e fitas. Fonte: Crasto, Freitas e Santiago (2012).	36
Figura 15: Travamento superior com canaleta e cantoneiras. Fonte: Crasto, Freitas e Santiago (2012).	36
Figura 16: Guia superior com furos oblongos. Fonte: MetSec (2014).	37
Figura 17: Método contínuo de fachada com empilhamento de painéis (a). Detalhe de fixação (b). Peça de fixação dos painéis na estrutura principal (c). Fonte: Catálogo Metsec (2011).	37
Figura 18: Paredes de LSF. (1) acabamento com poliuretano (isolamento rígido) e (2) tijolos.	40
Figura 19: Condutividade Térmica x Temperatura Média (ASTM - C -177). Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2014).	51
Figura 20: Trocas de calor através de paredes opacas. Fonte: Frota e Schifer (2001).	56
Figura 21: Imagem ilustrativa do <i>thermal core panel</i> . Fonte: National Gypsum, 2014.	57
Figura 22: Diferentes composições de LSF. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	58
Figura 23: Imagem termográfica dos painel de LSF. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	59
Figura 24: Técnicas de mitigação da ponte térmica: (a) pausas térmicas para componentes de construção. (b) aumento do caminho do fluxo de calor e (c) redução da área de contato do perfil com o revestimento. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	60
Figura 25: Tiras de ruptura térmica. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	60
Figura 26: Painel Padrão. Quadro estrutural e seção transversal. Fonte: Santos, Marins e Silva (2014).	61
Figura 27: Simulação do fluxo de calor sob o ponto de vista externo. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).	62

Figura 28: Zoneamento bioclimático brasileiro. Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).....	63
Figura 29: Variação da pressão ambiente em função do tempo para sons com períodos $T_1=50\text{ms}$ e $T_2=50\mu\text{s}$. Fonte: Bistafa (2006).....	68
Figura 30: Balanço energético sonoro. Fonte: Bistafa (2006).	71
Figura 31: Demonstração do isolamento acústico por camadas. Fonte: Way e Couchman (2008).	73
Figura 32: Representação simplificada de um sistema. Fonte: Shin e Hammond (2008).	73
Figura 33: Estrutura geral de medição do isolamento sonoro. Fonte: Prestes (2015).	74
Figura 34: Seções transversais típicas de perfis acústicos. Fonte: Way e Couchman (2008).	80
Figura 35: Imagem e detalhe da barra resiliente (resilient bar). Fonte: Way e Couchman (2008).	80
Figura 36: Corte esquemático que apresenta o detalhe de isolamento da viga metálica isolada das com lâ mineral. Fonte: Way e Couchman (2008).....	81
Figura 37: Planta esquemática que apresenta o isolamento dos pilares em relação as paredes de LSF. Fonte: Way e Couchman (2008).....	81
Figura 38: Planta esquemática do encontro de uma parede externa com uma parede divisória de ambientes. Fonte: Way e Couchman (2008).....	83
Figura 39: Corte esquemático da junção do piso e parede externa. Fonte: Way e Couchman (2008).	83
Figura 40: (a) Vão de alvenaria revestida com cerâmica entre as salas. (b) Instalação do quadro estrutural no vão entre as salas de emissão e recepção. Fonte: Autor.	85
Figura 41: Aresta do quadro estrutural com banda acústica e selante. Fonte: Autor.	85
Figura 42: Foto (a) – instalação da placa cimentícia. Foto (b) - fixação da placa cimentícia. Foto (c) – placa de gesso acartonado instalado com selante no perímetro. Fonte: Autor.	86
Figura 43: Instalação da membrana hidrófuga sobre os perfis. Fonte: Autor.	86
Figura 44: Fotos do miolo do painel sendo preenchido. (a) lã de rocha, (b) lã de vidro, (c) fibra cerâmica. Foto (d) confecção dos sacos de fibra cerâmica com 500g. Fonte: Autor.	87
Figura 45: Foto (a) - miolo preenchido com os pedaços de placas de gesso acartonado. Foto (b) Gesso moído. Fonte: Autor, 2015.	88
Figura 46: Foto (a) - aplicação do estuque sintético. Foto (b) - aplicação da massa PVA sobre o gesso. Foto (c) – aplicação das tiras de ruptura térmica sobre os perfis. Fonte: Autor.	90
Figura 47: Desenho esquemático do painel base do experimento. Fonte: Autor.	92
Figura 48: Planta do painel com apresentação das seções que serão calculadas, respectivas medidas e áreas. Fonte: Autor.	96
Figura 49: Planta do Laboratório do Departamento de Mecânica da UFPR. Fonte: Autor.	99
Figura 50: Foto do vão entre as salas. Laboratório do Departamento de Mecânica da UFPR. Fonte: Autor.	100
Figura 51: Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel. Fonte: Autor.	101
Figura 52: (a) Câmera FLIR E40. Fonte: FLIR Instruments (2015). (b) Termo higrômetro. Fonte: Incoterm (2015).	102
Figura 53: Painel MELX exposto a temperatura de 80°C na face externa por 120 min com medição a cada 10 min. Fonte: Autor	103
Figura 54: (a) Posição dos pontos para a mira a laser na face interna do painel (sala de recepção). Linha tracejada (área de abrangência do ponto P7). (b) Imagem do painel (sala de recepção). Fonte: Autor.	104

Figura 55: Imagem termográfica P7 fornecida pelo software da câmera após a inserção dos elementos (linhas, pontos e retângulo). Fonte: Autor.....	105
Figura 56: Imagem termográfica P1, P2, P3, P4, P5 e P6 fornecida pelo software da câmera após a inserção dos elementos (linhas, pontos e retângulos). Fonte:Autor.....	105
Figura 57: (a) Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01db. (b) Microfone de medição acústica 01db mce 212. (c) Computador com Matlab e o ITA—Toolbox. Fonte: Autor.	108
Figura 58: Planta das salas de emissão e recepção e equipamentos acústicos. Fonte: Autor.	109
Figura 59: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o desempenho térmico como critério mais importante. Fonte: Autor.....	112
Figura 60: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o desempenho acústico como critério mais importante. Fonte: Autor.....	113
Figura 61: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o custo como critério mais importante. Fonte: Autor.	114
Figura 62: Relação entre a transmitância térmica e a capacidade térmica dos painéis com propriedades térmicas calculadas. Fonte: Autor.	116
Figura 63: Fotos termográficas do painel XXXX. (a) no início do ensaio e (b) após 60 minutos de ensaio. Fonte: Autor.	117
Figura 64: Gráfico que relaciona a variação de temperatura nos painéis XXXX, XEXX e XELX durante 60 minutos nas linhas Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.....	118
Figura 65:Gráfico com a diferença de temperatura dos painéis com material de isolamento em seu interior após 60 minutos. Fonte: Autor.	119
Figura 66: Fotos termográficas (60 min de aquecimento). (a) XELX, (b) PELX (c) VELX e (d) FELX. Fonte: Autor.	121
Figura 67: Diferença de temperatura dos painéis com diferentes massas de acabamento interno após 60 minutos.	122
Figura 68: Variação de temperatura dos painéis para análise das tiras de ruptura térmica aplicadas sobre os perfis durante 60 minutos. Fonte: Autor.....	123
Figura 69: Gráfico geral com os resultados acústicos para as frequências de 20Hz a 20KHz para todos os painéis ensaiados. Fonte: Autor.....	125
Figura 70: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis XXXX, XEXX E VELX. Fonte: Autor.	126
Figura 72: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis VELX, RELX E FELX. Fonte: Autor.	127
Figura 72: Diferença padronizada de nível com apresentação da faixa de incerteza da medição para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis FELX, MELX E PELX. Fonte: Autor.....	127
Figura 73: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis VELX E VECX. Fonte: Autor.....	128
Figura 74: Gráfico com os custos dos painéis. Fonte: Autor.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: U-Fatores para as paredes de aço formadas a frio. Fonte: SFA (2008).	24
Tabela 2: Impactos ambientais relacionados com a estrutura. Fonte: Carmody e Weber (2007).	29
Tabela 3: Alternativas de revestimento e suas características. Fonte: Carmody e Weber (2007).	41
Tabela 4: Requisitos para caracterização das placas cimentícia. Fonte: SINAT – Diretriz N° 003/2012.....	44
Tabela 5: Isolamentos, suas características sustentáveis e custo. Fonte: Carmody e Weber. (2007)	47
Tabela 6: Análise química - flocos e fibras cerâmicas picadas. Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2013). ..	51
Tabela 7: Propriedades físicas típicas dos flocos de fibra. Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2013).	51
Tabela 8: Resultados do painel apontado na figura 33. Fonte: Santos, Marins e Silva (2014).	61
Tabela 9: Valores máximos para a transmitância térmica. Fonte: Tabela 11 da NBR 15575 - Parte 4	64
Tabela 10: Valores mínimos para a capacidade térmica. Fonte: Tabela 12 da NBR 15575 - Parte 4	64
Tabela 11: Índices, fórmulas e variáveis. Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).	66
Tabela 12: Índice de redução sonora ponderado, R_w , de fachadas. Fonte Tabela F.11, pág 58 da NBR 15575–4 (ABNT, 2013).	76
Tabela 13: Influência da isolamento acústica $D_{nT,w}$, sobre a inteligibilidade da fala para ruído no ambiente interno em torno de 35dB e 40dB. NBR 15575 (ABNT, 2013).	77
Tabela 14: Correspondência aproximada do ruído segundo níveis de desempenho.CBIC (2013).	77
Tabela 15: Desempenho acústico de paredes externas. Fonte: Way e Couchman (2008).	79
Tabela 16: Características físicas dos materiais.	91
Tabela 17: Nomenclatura dos painéis ensaiados. Fonte: Autor.	91
Tabela 18: Apresenta a tipologia e composição dos painéis segundo nomenclatura criada. Fonte: Autor.....	93
Tabela 19: Dimensões das seções consideradas para o cálculo da transmitância e capacidade térmica dos painéis. Fonte: Autor.	97
Tabela 20: Resistências consideradas para R_{si} e R_{se} . Fonte: NBR 15520 (ABNT 2005).....	97
Tabela 21: Tabela com os valores paritários	110
Tabela 22: Matriz da análise hierárquica tendo o critério de desempenho térmico como sendo o mais importante. Fonte: Autor.	112
Tabela 23: Matriz da análise hierárquica tendo o critério de desempenho acústico como sendo o mais importante. Fonte: Autor.	113
Tabela 24: Matriz da análise hierárquica tendo custo como sendo o mais importante. Fonte: Autor.....	114
Tabela 25: Resultados dos cálculos de transmitância e capacidade térmica dos painéis. Fonte: Autor.....	115
Tabela 26: Diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa, $D_{2m,nT,w}$ para ensaios de campo. Fonte: Tabela F.9, pág 57 da NBR 15575–4, Tabela I.5 pág 56 da NBR 15575–5)	124
Tabela 27: Diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) para os painéis ensaiados. Fonte:Autor.	124
Tabela 28: Custo do painel XXXX por m^2 . Fonte: Autor.....	129
Tabela 29: Custos incorporados ao painel XXXX . Fonte: Autor.	130
Tabela 30: Cenário 1 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.	132
Tabela 31: Cenário 2 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.	132
Tabela 32: Cenário 3 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.	132

SUMÁRIO

1 Introdução.....	8
1.1 Questões da pesquisa.....	10
1.2 Objetivo	10
1.3 Estratégia de pesquisa.....	10
2 Revisão bibliográfica.....	13
2.1 Light steel framing (LSF)	13
2.1.1 O que é LSF	13
2.1.2 Vantagens e desvantagens do LSF	13
2.1.3 Panorama histórico do Sistema Light Steel Framing	17
2.1.4 Evolução normativa relacionada ao LSF	20
2.1.5 Características sustentáveis do LSF.....	24
2.1.6 Projeto arquitetônico preliminar de LSF	29
2.1.7 Tipologias estruturais de LSF	31
2.1.7.1 Painéis autoportantes em LSF	31
2.1.7.2 Painéis não portantes em LSF (vedação vertical externa)	34
2.2 Componentes do painel de vedação vertical	38
2.2.1 Quadro estrutural	38
2.2.2 Revestimento externo, interno e proteção contra a umidade	40
2.2.2.1 Placa cimentícia	43
2.2.2.2 Gesso acartonado	45
2.2.2.3 Membrana Hidrófuga	46
2.2.3 Isolamento instalado no interior da parede	47
2.2.3.1 Lã de rocha	49
2.2.3.2 Lã de vidro	50
2.2.3.3 Resíduo industrial (de flocos e mantas produzidas com fibras cerâmicas)	50
2.2.3.4 Resíduo da construção seca - drywall (moído e em pedaços)	52
2.2.4. Acabamento interno e externo	53
2.2.4.1 Estuque sintético (base-coat).....	53
2.2.4.2 Massa corrida PVA	54
2.3 Desempenho Térmico.....	54
2.3.1 Base conceitual	55

2.3.2. Massa térmica em vedações externas de LSF.....	56
2.3.3 Ponte Térmica em vedações de LSF.....	57
2.3.4 Desempenho térmico segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013)	62
2.3.5 Cálculo da transmitância e capacidade térmica	65
2.4 Desempenho Acústico	66
2.4.1 Base conceitual	67
2.4.2 Método de função de transferência.....	73
2.4.3 Desempenho acústico segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013)	75
2.4.4 Formas de mitigação das fontes de ruídos em paredes externas de LSF... 78	
3 Método de pesquisa	84
3.1 Materiais utilizados na composição dos painéis.....	84
3.1.1 Componentes constantes.....	84
3.1.1.1 Quadro estrutural em aço leve.....	84
3.1.1.2 Placa cimentícia aplicada na face externa	85
3.1.1.3 Chapa de gesso acartonado standard aplicada na face interna .	86
3.1.1.4 Membrana hidrófuga	86
3.1.2 Componentes variáveis.....	87
3.1.2.1 Materiais de isolamento.....	87
3.1.2.2 Acabamento externo – Estuque sintético	89
3.1.2.3 Acabamento interno (variável).....	89
3.1.2.4 Tiras para ruptura da ponte térmica.....	90
3.1.3 Resumo das características físicas dos componentes dos painéis	91
3.2 Matriz experimental.....	91
3.3 Levantamento do custo dos painéis.....	94
3.4 Avaliação do desempenho térmico.....	95
3.4.1 Cálculo segundo procedimento 1A (Simplificado – normativo).....	95
3.4.1.1 Cálculo da Transmitância Térmica (U)	97
3.4.1.2 Cálculo da capacidade térmica	98
3.4.2 Experimento térmico	99
3.4.2.1 Infraestrutura utilizada	99
3.4.1.2 Procedimento de ensaio.....	102
3.5 Avaliação do desempenho acústico.....	107
3.5.1 Procedimento do ensaio	107
3.5.2 Infraestrutura utilizada.....	108

3.5.3 Caracterização do experimento.....	109
3.6 Análise hierárquica.....	110
4 Análise dos resultados.....	115
4.1 Análise do desempenho térmico - procedimento 1A	115
4.2 Análise do desempenho térmico dos painéis segundo o experimento	117
4.3 Análise do desempenho acústico.....	124
4.4 Análise de custo dos painéis.....	129
4.5 Análise hierárquica dos painéis	131
5 Conclusões.....	133
6 Referências Bibliográficas	136

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil no Brasil passa por um momento de reformulação para atender a pressão do crescimento populacional nos centros urbanos e áreas rurais. Segundo estudo produzido pela Caixa Econômica Federal em 2011 sobre a demanda habitacional no Brasil tem-se uma estimativa na ordem de 9.297.214 unidades habitacionais (CEF, 2011).

Para que a construção civil torne-se apta a desempenhar este papel, é necessário que esteja capacitada a produzir edificações que, além de respeitarem condições indispensáveis como habitabilidade, funcionalidade, durabilidade, segurança e bom acabamento, também apresentem características relacionadas à produtividade, construtividade, baixo custo e desempenho ambiental, quesitos de grande importância que, atualmente, representam um desafio para os profissionais da área (GREVEN e BALDAUF, 2007).

Segundo Colombo e Bazzo (2013), dado o atraso em que nos encontramos e a necessidade eminente de desenvolvimento, uma alternativa é a importação de tecnologias que devem sofrer adequações e adaptações para uso com a consciência de que o desempenho em termos de produtividade será condicionado por vários fatores como legislação, qualificação da mão de obra, qualificação técnica, etc.

Segundo Crasto, Freitas e Santiago (2012), o caminho para mudar tal quadro passa necessariamente pela construção industrializada, mão de obra qualificada, otimização dos custos mediante a contenção do desperdício de materiais, padronização, racionalização dos processos e cronogramas rígidos de planejamento e execução.

Tais características aparecem claramente no sistema “light steel framing” (LSF), que é caracterizado como um sistema aberto, modular, de rápida execução, fácil manutenção e mais sustentável quando comparado à sistemas construtivos não racionalizados.

Segundo Amundaraim (2007), o LSF é uma técnica construtiva que utiliza perfis estruturais metálicos leves com capacidade de suporte de carga que juntamente com as ligações dão rigidez à estrutura. O espaço vazio no interior do quadro de aço é normalmente preenchido com isolamento térmico, acústico e resistente ao fogo e revestido por chapas tanto na face interna como na face externa (Figura 1).



Figura 1: Estrutura de LSF sem os revestimentos, isolamento e acabamento. Fonte: SFA, 2008.

O Brasil está aberto a novas tecnologias, mas a falta de informação sobre o LSF e seus componentes mantém arraigada a insegurança sobre o sistema como um todo. Um dos motivos para a falta de credibilidade é a qualidade das informações que são insuficientes, pois carecem de informações técnicas e especificações relacionadas às exigências normativas, controle de qualidade e desempenho.

Em julho de 2013 entrou em vigor a NBR 15575 (ABNT, 2013) que estabelece padrões no que se refere à eficiência das edificações e inicia um novo ciclo na construção civil brasileira definindo parâmetros para que sistemas construtivos já utilizados mundialmente sejam adaptados à realidade brasileira (CBIC, 2013).

Observa-se que lacunas tecnológicas precisam ser preenchidas e que a pesquisa de materiais alternativos com características sustentáveis e de menor custo podem contribuir para o avanço sustentável do LSF no Brasil. A falta de informação sobre o LSF e a necessidade de pesquisa e adaptação do sistema para o Brasil motivam esta pesquisa que tem como foco a análise do desempenho térmico e acústico de diversas composições de painéis verticais externos em LSF e a pesquisa de materiais alternativos mais sustentáveis e de baixo custo.

1.1 QUESTÕES DA PESQUISA

É possível obter um painel de vedação vertical que possua bom desempenho térmico e acústico com menor custo e mais sustentável quando comparado a painéis verticais usualmente utilizados no Brasil?

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é avaliar a eficiência de diferentes alternativas de isolantes térmicos e acústicos de vedações verticais externas em LSF.

Como objetivos específicos, tem-se:

- avaliar a eficiência de painéis com materiais do mercado normalmente empregados como isolantes térmicos e acústicos para vedações verticais em LSF;
- avaliar a eficiência de painéis com materiais alternativos, por exemplo resíduos industriais e da construção civil, como isolantes térmicos e acústicos, visando aumento de sustentabilidade e redução de custo;
- avaliar materiais usualmente utilizados em outros sistemas construtivos e que possam ser adaptados ao sistema LSF.
- avaliar a influência da utilização de banda acústica na redução do efeito de ponte térmica que ocorre nos perfis metálicos; e
- dos painéis utilizados, avaliar qual deles é o mais indicado como isolante térmico e acústico através da análise hierárquica e do atendimento aos requisitos da NBR 15575.

1.3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Esta dissertação trata da avaliação térmica e acústica de vedações verticais externas de LSF e utiliza várias formas de atingir seu objetivo tendo como base os parâmetros apontados na NBR 15575 (ABNT, 2013).

A revisão bibliográfica está caracterizada pela pesquisa dos assuntos que envolvem a dissertação e inicia com uma revisão sobre o sistema construtivo LSF, suas diversas tipologias, histórico, características do sistema e seu caráter sustentável. A falta de material normativo no Brasil motivou a pesquisa sobre as normas que regem a

construção no Brasil e de alguns países onde o LSF é o processo construtivo industrializado.

Para análise do desempenho térmico, foi necessária uma revisão bibliográfica sobre conceitos térmicos, o comportamento do painel de LSF com relação a sua massa, pontes térmicas que ocorrem de forma heterogênea e formas de mitigação da transferência térmica em sistemas de LSF. As normas vigentes no Brasil e códigos internacionais foram pesquisados para que a análise do desempenho estivesse embasada em parâmetros normativos.

Para a análise do desempenho pesquisou-se sobre os conceitos acústicos, isolamento, absorção e as formas de mitigação das fontes de ruídos que, em conjunto com a pesquisa sobre normas nacionais e códigos internacionais, teve o objetivo de formar uma base para o desenvolvimento dos ensaios e análise dos resultados.

A escolha dos procedimentos de avaliação dos painéis levou em consideração as prescrições da NBR 15575 (ABNT, 2013) e as características dos painéis. A simulação por software foi descartada como procedimento de análise por falta de informação sobre as propriedades térmicas e acústicas dos materiais reciclados existindo a necessidade de se executar um experimento para a análise do desempenho térmico e acústico do painel.

Para avaliação do desempenho térmico foram seguidos dois procedimentos:

- Cálculo da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) segundo a NBR 15220 - Parte 2 - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ABNT, 2005). Os valores obtidos nos cálculos foram confrontados com os índices sugeridos na NBR 15575 - procedimento 1A (Simplificado – normativo) que oferece critérios para o envelopamento da obra. Este procedimento de análise será aplicado apenas nos painéis que possuírem propriedades térmicas conhecidas.

- Experimento térmico. Obtenção da diferença de temperatura entre as faces do painel durante o aquecimento de face externa com temperatura constante (80 °C) e tempo determinado (60 min) e medições termográficas na face interna.

A análise acústica foi feita exclusivamente em experimento por falta de dados de alguns materiais para compor simulações acústicas. Para avaliação do desempenho acústico foi elaborado um experimento com a utilização do Método de Função de Transferência que se baseia na obtenção da resposta ao impulso em ambas as salas para o cálculo da diferença de nível.

A elaboração do experimento térmico e acústico incluiu três variáveis que nortearam o início do planejamento: local para realização, forma de medição e configuração da análise dos resultados. Como o objetivo é comparar o desempenho, era necessário o controle do ambiente quanto à temperatura, umidade, ventilação e ruído.

O laboratório de acústica do Departamento de Mecânica da UFPR (local de realização dos experimentos) pôde ser facilmente controlado e como possui um ambiente favorável para a medição acústica, foi necessária sua preparação para o ensaio térmico que incluiu a execução de uma fonte de calor controlada por termostato e disjuntor mantivesse a temperatura constante por tempo determinado. A medição térmica foi feita com câmera termográfica infravermelha cordialmente cedida cordialmente pelo Instituto Federal do Paraná (IFPR) e em conjunto com os equipamentos de acústica do laboratório possibilitou a execução dos ensaios.

Para a escolha e caracterização dos componentes dos painéis, fez-se um levantamento dos materiais mais utilizados em construções de LSF no Brasil, resíduos industriais, resíduos da construção civil e materiais já utilizados em outros sistemas construtivos ou segmentos da construção civil que possuíssem características de segurança contra incêndio e que poderiam ser utilizados para substituir tais componentes.

Foram determinados componentes constantes e variáveis para a montagem da matriz experimental e para a execução dos ensaios os materiais foram adquiridos junto à indústria, obras e lojas específicas para a construção seca.

Com a matriz do experimento, protocolos, planilha e painel com os componentes constantes instalados, deu-se início aos ensaios que eram executados após a instalação dos componentes variáveis formando assim cada painel. A instalação dos componentes contou com um ajudante especializado em construção seca que também fez a montagem da fonte de calor. As medições térmicas e acústicas eram feitas em dias alternados para que o painel estivesse na temperatura ambiente e não sob influência da fonte de calor.

Os procedimentos de ensaio duravam aproximadamente 3 horas e foram executados com a ajuda de dois alunos graduandos que auxiliaram na execução dos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGHT STEEL FRAMING (LSF)

2.1.1 O que é LSF

Simplificadamente, Crasto (2005) define o LSF como sendo um sistema construtivo industrial aberto, de concepção racional, caracterizada pelo uso de perfis formados a frio de aço galvanizado compondo a estrutura e por subsistemas que proporcionam uma construção industrializada e seca. É um sistema construtivo empregado mundialmente, que gera menor quantidade de resíduos, menor consumo de energia na movimentação de materiais e menor impacto na implantação da obra.

Rodrigues (2006) explica que existem dois conceitos básicos relativos ao Sistema Light Steel Framing (LSF): *Frame* é o esqueleto estrutural projetado para dar forma e suportar a edificação, sendo composto por elementos leves – os perfis formados a frio (PFF) e *Framing* é o processo pelo qual se unem e vinculam esses elementos. Assim, pode-se encontrar na bibliografia internacional as expressões *Light Steel Frame Housing* na Europa e *Residential Cold-Formed Steel Framing* nos EUA, referindo-se as residências construídas com painéis estruturados com perfis de aço formados a frio.

Ainda de acordo com Rodrigues (2006), um aspecto particular do LSF que o diferencia de sistemas construtivos tradicionais é ser composto por subsistemas (estruturais, de isolamento, de acabamento, de cobertura, etc.) que funcionam em conjunto. Os perfis formados a frio (montantes, guias, cartolas, etc.) formam um “esqueleto” estrutural que compõem os painéis verticais, pisos e estruturas de telhado. A estrutura é preenchida por componentes com propriedades térmicas e acústicas e revestidas com chapas que são parafusadas a estrutura de aço, entre elas: Drywall (gesso acartonado), OSB (Oriented Strand Board), placa cimentícia, siding vinílico, etc.

2.1.2 Vantagens e desvantagens do LSF

De acordo com Pinho (2009), a escolha do sistema construtivo não deve ser uma competição entre os diferentes tipos de estrutura, mas uma decisão com base nas características de cada sistema. Os sistemas devem ser analisados priorizando as características mandatórias e também as desejáveis.

Crasto, Freitas e Santiago (2012), Pinho (2009), Amundarain (2007), Gorgolewski (2006) e NASFA (2014) apontam como vantagens do LSF a precisão dimensional, a reciclabilidade, a facilidade de montagem, a possibilidade de controle dos níveis de desempenho térmico e acústico e complementam que ao se utilizar o sistema LSF, uma série de vantagens são comprovadas, como: alta resistência, baixo peso (tanto da estrutura como dos demais componentes), resistência ao ataque de insetos, racionalidade, industrialização e diminuição dos resíduos além do que, alguns materiais utilizados são recicláveis, contribuindo para a sustentabilidade da edificação.

A North American Steel Framing Alliance NASFA (2013) destaca algumas vantagens para o construtor: o material é leve e de fácil instalação, os componentes possuem pouca variação dimensional e de qualidade (produzidos industrialmente), facilidade na gestão de execução e de toda a logística de descarte.

Pinho (2009) comenta sobre o alívio da estrutura de fundação quando se compara sistemas leves e sistemas pesados. Relata que a redução do custo de uma estrutura executada em um solo resistente pode ser pequena para sistemas leves. Entretanto, a redução das cargas de uma estrutura leve executada em solo ruim pode viabilizar a própria construção. Portanto, o custo das fundações em alguns casos será um importante fator de decisão sobre o tipo de estrutura a ser usada em uma obra.

Amundarain (2007) destaca o baixo custo do sistema LSF. Essa vantagem econômica ainda não reflete a realidade brasileira já que estudos demonstram que o sistema só possui baixo custo quando a repetição em grande escala é característica do empreendimento.

Crasto, Freitas e Santiago (2012) comentam sobre a redução do tempo de obra, que é dada pela fabricação da estrutura que pode ocorrer em paralelo com a execução das fundações e a possibilidade de se trabalhar em diversas frentes de serviços simultaneamente. Sobre esta vantagem, Pinho (2009) argumenta que quanto menor for o tempo de construção melhor. Em uma obra comercial, por exemplo, qualquer antecipação representa redução do tempo de amortização do investimento.

Essa vantagem construtiva, em alguns casos, é encarada com desvantagem, pois como o tempo de obra é menor consequentemente o desembolso é muito mais agressivo. O empreendedor deve estar preparado para este investimento e o tempo de construção deve estar compatibilizado com a capacidade de desembolso.

Crasto, Freitas e Santiago (2012) apontam o ganho de área interna, já que as seções dos pilares e vigas de aço são substancialmente mais esbeltas do que as

equivalentes em concreto, resultando em melhor aproveitamento do espaço interno e aumento da área útil quando comparado à alvenaria de tijolos e estruturas de concreto. Afirmam também que existe uma grande flexibilidade para adaptações, ampliações, reformas e modificações, além de facilitar a passagem e controle das instalações e ser altamente compatível com outras estruturas e materiais de acabamento.

Crasto, Freitas e Santiago (2012) comentam que em uma obra convencional, o desperdício de materiais pode chegar a 25%. A estrutura em aço possibilita a adoção de sistemas industrializados, fazendo com que o desperdício seja reduzido e exista linhas de montagem.

O canteiro de obras fica naturalmente mais organizado e limpo devido entre outros à ausência de grandes depósitos de areia, brita, cimento, madeiras e ferragens. O ambiente limpo e com pouco entulho oferece melhores condições de segurança ao trabalhador contribuindo para a redução dos acidentes na obra. (MEDEIROS, 2014).

Sobre as desvantagens do LSF Amundarain (2007) ressalta o desconhecimento sobre o sistema que desencadeia uma preferência por construções executadas com técnicas tradicionais.

Michalka (2003) aponta como desvantagem a realidade brasileira e coloca que nas últimas duas décadas houve pouco desenvolvimento e introdução de novas tecnologias no Brasil. Máquinas foram incorporadas ao canteiro, mas a execução permaneceu artesanal. A construção civil é o único setor da economia nacional que não se industrializou de forma notável, apresentando grande variabilidade tecnológica onde coexistem processos produtivos dos mais tradicionais aos mais modernos.

A Companhia de Desenvolvimento Habitacional Urbano (CDHU, 2012) comenta que a importação de modernos sistemas de construção se depara com a realidade brasileira e as dificuldades e desafios a serem transpostos atrasando a modernização da construção civil como um todo e cita algumas desvantagens com relação ao LSF:

- ideia de que a construção feita com sistemas racionalizados e industriais tem arquitetura repetitiva, são desagradáveis esteticamente e frágeis;
- pouca quantidade de técnicos que possuam conhecimento em sistemas inovadores e planejamento executivo ainda na fase de projeto;
- pouco investimento na qualificação da mão de obra de toda a cadeia da construção, e fiscalizadores para sistemas construtivos inovadores;

- falta de produtos de qualidade com laudos técnicos e sistemas que atendam a uma normativa; e
- barreira cultural para edificações que não sejam de alvenaria de blocos, concreto e tijolos.

Pinho (2009) comenta que os recursos e equipamentos disponíveis para o construtor podem influenciar na escolha do sistema estrutural. O construtor que trabalha com processos tradicionais, possui equipamentos já amortizados e mão de obra treinada e tem uma tendência a utilizá-los para reduzir custos inviabilizando a incorporação de novos sistemas.

De acordo com Santos, Martins e Silva (2014), outra desvantagem do LSF é a elevada condutividade térmica do aço que gera pontes térmicas e ressalta a necessidade de isolamentos e estratégias que minimizem esse efeito. Apontam também à baixa massa térmica das vedações verticais que propicia maiores flutuações diárias de temperatura, desconforto e maior consumo de energia quando projetado inadequadamente.

Construir em aço é uma questão relevante visto que as respostas estão quase sempre apoiadas em uma extensa lista de vantagens que possuem informações insuficientes para uma avaliação correta e estudos comparativos de custos no Brasil. Em alguns casos, a simples afirmação de que a estrutura em aço ficaria mais cara encerra uma análise sem maior aprofundamento. Em outras situações, a opção por sistemas ditos convencionais, pelos simples desconhecimento de outros sistemas, não garante que a decisão tenha sido a mais adequada (PINHO, 2009).

A Caixa Econômica Federal apoia a utilização de novas tecnologias por meio de sistemas construtivos inovadores, uma vez que mantém um grupo de profissionais, engenheiros e arquitetos que conduzem as análises com base nos relatórios dos ensaios das instituições técnicas, conforme as Diretrizes do Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores - SINAT, do Ministério das Cidades (CBIC, 2013).

Apesar do apoio da CEF, uma desvantagem é existir restrições de financiamento junto aos órgãos governamentais para habitações de interesse social dentro do programa governamental Minha Casa Minha Vida.

Segundo a CEF (2013) é condição para aceitação do sistema construtivo inovador que o construtor possua a Viabilidade Prévia (validade de seis meses) ou a Viabilidade Definitiva (validade de dois anos).

Para a obtenção da Viabilidade Prévia, o proponente fica submetido à Padronização e Normas Técnicas para a Construção Civil (GEHPA) e Gerências Executivas de Habitação (GIHAB) e precisa apresentar a ficha de informações da inovação tecnológica, projetos, especificações, ensaios tecnológicos para os requisitos de desempenho conforme NBR 15575/2013, RTA (Relatório técnico de avaliação), manual do usuário, plano de monitoramento da obra, compromisso de realização da “Avaliação Técnica em Uso” após 24 meses da expedição do “Habite-se” e preenchimento dos termos de garantia da inovação por dez anos (CEF, 2013).

Para a obtenção da Viabilidade Definitiva o proponente deve apresentar o RTA (Relatório técnico de avaliação), homologação do sistema SINAT com respectivo DATec, relatório final sobre o monitoramento da obra, relatório de “Avaliação Técnica em Uso” após 24 meses da expedição do habite-se. Caso o construtor não seja detentor da tecnologia do sistema construtivo, ele pode contratar a cessão da tecnologia pelo detentor do sistema.

2.1.3 Panorama histórico do Sistema Light Steel Framing

De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012), a origem do sistema LSF remonta ao início do século XIX, com as habitações em madeira construídas pelos colonizadores em território norte-americano. O método era rápido e produtivo, formado por peças de madeira serrada de pequena seção transversal conhecida por *balloon framing*. A partir daí, as construções em madeira conhecidas por *woodframe* tornaram-se a tipologia residencial mais comum nos Estados Unidos.

Aproximadamente cem anos depois, em 1933, com o grande desenvolvimento da indústria do aço, foi lançado na Feira Mundial de Chicago o protótipo de uma residência em *steel framing*, que utilizava perfis de aço em substituição à estrutura de madeira que teve como slogan “*a casa da nova era*” (Figura 2) (FRECHETTE, 1999).

O crescimento da economia americana, a abundância de aço no período pós 2ª Guerra, as flutuações de preço e a qualidade da matéria-prima estimularam a substituição da madeira. Outros fatores positivos para tal mudança foram a eficiência estrutural e melhor capacidade de resistir a catástrofes naturais como terremotos e furacões (FRECHETTE, 1999).

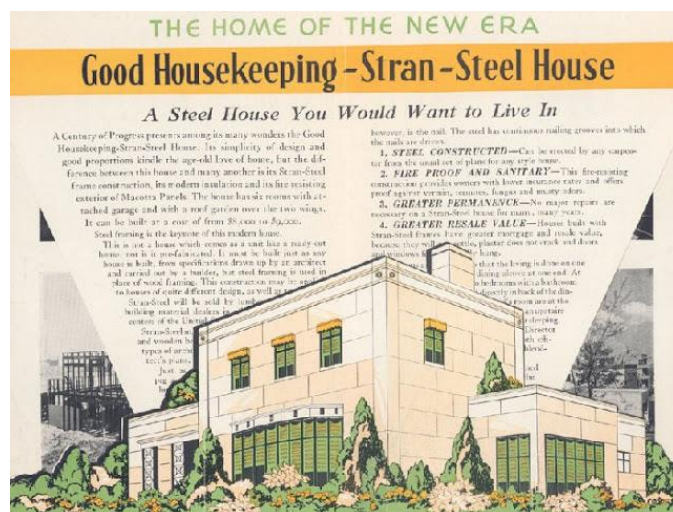


Figura 2: Anúncio publicitário para o Good Housekeeping Stran-Steel House (1933). Fonte: Brian Carter, War, Design and Weapons, (NJ, Princeton Architectural Press, 2005).

De acordo com Castro (2005), uma grande quantidade de construções começou a aparecer no Japão após a 2ª Guerra na reconstrução de quatro milhões de casas destruídas por bombardeios. O governo japonês restringiu o uso da madeira em construções autoportantes a fim de proteger os recursos florestais e também para promover construções não inflamáveis. Como consequência, atualmente, o Japão detém o maior conhecimento na área de construções em perfis leves de aço e o mercado é altamente desenvolvido, principalmente no que tange a industrialização dos processos.

Imbuídos pelo espírito da industrialização, não mais passível de regressão, profissionais da área iniciaram estudos a respeito da pré-fabricação e, conseqüentemente, da coordenação modular (CHEMILLIER, 1980 apud GREVEN e BALDAUF *et al.*, 2007). A racionalização, industrialização, modularização de produtos e treinamento dos trabalhadores foram quesitos levados a sério e a organização dos processos uma busca constante.

Veljkovic e Johansson (2006) comentam sobre o trabalho de desenvolvimento do processo construtivo do LSF que aconteceu na Suécia como um exemplo muito bem sucedido da cooperação entre a indústria e a universidade tendo o professor Rolf Baehre, do Instituto Real de Tecnologia em Estocolmo como líder. O desenvolvimento dos produtos e sistema foi tão bem sucedido que em menos de uma década o LSF assumiu o mercado de edifícios industriais. Rolf Baehre presidiu uma comissão para escrever um código sueco para estruturas de aço formadas a frio.

De acordo com Lawson e Odgen (2008), na Inglaterra encontram-se indústrias focadas na sistematização dos processos executivos. A *Pre-fabrication by off-site*

manufacture (OSM) é um exemplo do que existe de mais moderno na construção. Nestes processos industriais, são produzidas peças volumétricas semiacabadas que são transportadas até o local da obra (Figura 3).



Figura 3: Produção de painéis estruturais em LSF. Fonte: Article R.W. Lawson e Odgen (2008).



Figura 4: Instalação de um módulo no Edifício Murray Grove. Londres, 1999. Fonte: Lawson e Odgen (2008).

Construções industriais atendem o mercado inglês de edifícios residenciais com preços acessíveis, especialmente nas cidades do interior. O premiado edifício Murray Grove (Figura 4) projetado pela Cartwright Pikard Architects foi concluído em 1999 com o sistema de construção modular Yorkon. Foi o primeiro conjunto habitacional modular com cinco andares, montado em doze semanas totalizando 2.150m². As unidades modulares chegaram ao local da obra com canalização, banheiro equipado, cozinha e tapetes (LAWSON, E ODGEN, 2008).

Segundo Crasto, Freitas e Santiago (2012), no Japão, residências são construídas a partir de unidades modulares que podem inclusive ser personalizadas através de opções de catálogo oferecidas pela indústria aos clientes.

De acordo com Castro (2005) o drywall foi o grande precursor da implantação do LSF no Brasil e de acordo com Batista (2005) foi um dos aceleradores da produção e uso de aço na construção no Brasil.

No Brasil, no final da década de 90, com o setor cada vez mais favorável à introdução de novas tecnologias, alavancado pela aceitação do drywall e pelo processo de globalização, algumas construtoras começaram a importar dos Estados Unidos kits pré-fabricados em LSF para a montagem de casas residenciais. Apesar dessas construções pré-fabricadas não serem adequadas nem adaptadas ao clima e a cultura brasileira e nem possuírem normas vigentes no país, percebeu-se a eficiência do sistema enquanto processo industrializado (BATISTA, 2005).

No Brasil, desde então, o LSF tem sido implantado apenas pontualmente sem avanços nos conceitos modulares industrializados. No capítulo 2.1.7 sobre tipologias das estruturas, vê-se um aprimoramento da indústria modular internacional com significativa diminuição do trabalho no canteiro de obras e a exploração máxima das características modulares e logísticas que construções em LSF possibilitam.

2.1.4 Evolução normativa relacionada ao LSF

No Brasil, entre o final da década de 80 e meados da década de 90, um grande número de novas tecnologias foram incorporadas na construção, mas apesar disso, poucas mudanças foram introduzidas na forma de gerenciamento dos recursos humanos (SCHMITT ET. AL, 1992).

Greven e Baudauf (2007) pontuam que uma iniciativa que desencadearia o processo de racionalização na construção aconteceu em 1946 quando o Brasil, seguindo o exemplo dado pelos países europeus, Canadá e Estados Unidos, promoveu estudos sobre a coordenação modular. Em setembro deste mesmo ano, foram instalados os trabalhos da Comissão de Estudos dos Elementos da Construção, na ABNT, no Rio de Janeiro. Em 1947 foi concluído o primeiro projeto de norma, publicada em 1950, sob o título NB-25R: Modulação das Construções.

A coordenação modular tem como objetivo a racionalização da construção sendo assim um dos princípios do processo industrializado. Rosso (1980) define racionalização como a aplicação mais eficiente de recursos para a obtenção de um produto dotado da maior efetividade possível. Complementa que com normas técnicas

bem elaboradas seguidas por um eficiente sistema de certificação, os componentes sofrem uma padronização dimensional e uma redução da variedade de tipos.

Greven e Baudauf (2007) comentam que o Brasil se posicionava entre os primeiros países a estudar e possuir uma norma de coordenação modular. No entanto, enquanto nos demais países foram mobilizados recursos humanos e materiais para dar continuidade aos estudos iniciados, infelizmente, o mesmo não ocorreu no Brasil, onde os que participavam da citada Comissão viram esgotados seus recursos e ficaram impossibilitados de levar adiante os estudos.

De acordo com Greven e Baudauf (2007), em 1969 a NB-25R: Modulação das Construções foi revisada pela Comissão de Coordenação Modular da ABNT, resultando na norma NB25, intitulada *Coordenação Modular da Construção – bases, definições e condições básicas*. O trabalho desenvolvido pela Comissão foi programado para ser realizado em três etapas: estudos preliminares, estudos teóricos e aplicação prática, contudo, não se encontrou dados sobre a existência de relatórios referentes à terceira etapa que era justamente o plano de implantação.

Atualmente no Brasil, a não aplicação da coordenação modular nos projetos, a falta de normas, e treinamento sobre o LSF, transformaram-se em obstáculos para que o sistema se estabeleça no país.

No Catálogo de Processos e Sistemas Construtivos para Habitação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) encontram-se vários exemplos de novas tecnologias e sistemas construtivos de excelente qualidade, mas apesar das iniciativas e mudanças provocadas pela introdução dos conceitos de “qualidade” e da própria NR-18, ainda se está muito distante da implantação eficiente dessas tecnologias. (GREVEN e BAUDAUF, 2007).

Ainda assim, diversos trabalhos foram desenvolvidos. No ano de 2001 foi publicada a primeira norma brasileira para chapas de gesso propostas para o sistema drywall e em seguida foi apresentada a norma dos perfis de aço galvanizado também destinados ao sistema drywall.

Em 2001 foi publicada a NBR 14762 (ABNT, 2001) que estabelece os princípios gerais para o dimensionamento de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, com espessura máxima igual a 8 mm, conectados por parafusos e destinados a estruturas de edifícios. Essa norma foi cancelada em 08/07/2010 e substituída pela NBR 14762 (ABNT, 2010).

Crasto apresentou em 2005 o processo construtivo do sistema LSF para a elaboração de projetos de arquitetura que utilizam esse sistema, contribuindo para a publicação do Manual de Construção em Aço - Steel Framing Arquitetura do IBS/CBCA que aponta os aspectos de projeto e montagem para edificações com o sistema construtivo LSF. Este manual é o nono de uma série relacionada à construção em aço e em 2012 sofreu uma atualização e está disponível no site do CBCA.

Rodrigues publicou em 2006, pelo IBS/CBCA, o Manual de Construção em Aço - Steel Framing: Engenharia contendo os principais conceitos relativos aos perfis formados a frio, dimensionamento e ligações segundo a NBR 1462 (ABNT, 2001).

Em 2008, Silva publicou o décimo quinto manual do CBCA que apresenta de forma didática o dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 (ABNT, 2001) e NBR 6355 (ABNT, 2003). O manual inclui o programa Dimperfil que calcula os esforços resistentes em barras isoladas, bem como as propriedades geométricas da seção bruta e efetiva que serão usadas no cálculo de deslocamentos.

Em 13 agosto de 2007 foi publicada no Diário Oficial da União a Portaria e o regimento do SINAT (Sistema Nacional de Avaliação Técnica) que é uma iniciativa da comunidade técnica nacional organizada pelo Ministério das Cidades que regulamenta mecanismos de uniformização e avaliação dos sistemas construtivos e produtos inovadores para a obtenção do DATec (Documento Técnico de Avaliação).

O SINAT é proposto para suprir lacunas da normalização técnica prescritiva, ou seja, para avaliar produtos não abrangidos por normas técnicas prescritivas. A intenção do SINAT pode ser resumida na harmonização de procedimentos para a avaliação de novos produtos ou processos construtivos para garantir que todos os aspectos relevantes ao comportamento sejam considerados no processo de avaliação.

A Diretriz SINAT Nº 03 Revisão 01 – Sistemas construtivos estruturados em perfis de aço conformados a frio, com fechamento em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”) foi primeiramente publicada em 2009, revisada e novamente publicada em dezembro de 2012 após adequações à Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013).

O DATec (Documento Técnico de Avaliação) é um facilitador para construtoras, incorporadoras e fabricantes adquirirem concessão de crédito para empreendimentos, que no caso do LSF, deve estar em acordo com o SINAT – Diretriz Nº 003/2012. É uma ferramenta imprescindível às entidades públicas de crédito, por ser

um documento de comprovação da qualidade, da segurança habitacional, da economia e da sustentabilidade do produto ou sistema construtivo (SINAT, 2014).

O processo, desde a apresentação do produto ou sistema até a emissão do DATec, leva em média nove a doze meses. Atualmente poucas empresas detêm o DATec do LSF. Em maio de 2013 foi concedido ao “Sistema Construtivo a Seco SAINT-GOBAIN – Light Steel Frame” o Documento de Avaliação Técnica DATec N° 14 que destina-se à produção de paredes e/ou coberturas em LSF.

Os SINATs e DATecs estão submetidos à norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) que entrou em vigor no dia 19 de julho de 2013. Ela estabelece parâmetros, objetivos e quantitativos que podem ser medidos. Dessa forma, busca-se o disciplinamento das relações entre os elos da cadeia econômica (rastreabilidade), a diminuição das incertezas dos critérios subjetivos (perícias), a instrumentação do Código de Defesa do Consumidor (CBIC, 2013).

O conjunto normativo da NBR 15575 – Edificações Habitacionais – traz o conceito de comportamento em uso dos componentes e sistemas das edificações, sendo que a construção habitacional deve atender e cumprir as exigências dos usuários ao longo dos anos, promovendo o amadurecimento e melhoria da relação de consumo no mercado imobiliário, na medida em que todos os partícipes da produção habitacional (projetistas, fornecedores de material, componente e/ou sistema, construtor, incorporador e usuário) são incumbidos de suas responsabilidades (CBIC, 2013).

A norma foi organizada por elementos da construção, percorrendo uma sequência de exigências relativas à segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico e acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental) (CBIC, 2013). Para cada necessidade, aparece a sequência de requisitos de desempenho, critérios de desempenho e respectivos métodos de avaliação. O conjunto normativo compreende seis partes:

- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
- Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas; e
- Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Em outros países os índices e informações sobre o sistema são fornecidas pelo poder público, diferente de como acontece no Brasil, onde cabe as construtoras aprovarem e testarem seus sistemas construtivos. A SFA (Steel Framing Alliance) publicou em agosto de 2008 o Thermal Design and Code Compliance For Cold-Formed Steel Walls que teve como objetivo prestar as informações mais atualizadas sobre o desempenho térmico de LSF, e fornecer os elementos necessários para que projetistas e construtores cumpram os códigos de energia, informando a resistência (*R-Value*) e transmitância (*U-Factor*) térmica das composições relacionadas ao clima de cada região.

De acordo com a SFA (2008), quando um código especifica um *R-Value* de isolamento a ser cumprido, basta somar o *R-Value* do isolamento do interior da parede ao isolamento exterior que será aplicado sobre a estrutura de aço. O resultado da soma dos *R-Value* dos componentes da parede deve ser igual ou maior do que o *R-Value* listado no código de construção.

A Tabela 1 é um exemplo de como a informação é passada para projetistas e construtores. Os índices incluem o impacto da estrutura de aço no desempenho térmico do conjunto através da aplicação de um fator para o isolamento do interior da parede. Os componentes ofertados no mercado devem apresentar seu *R-Value* para que o projetista consiga compor a vedação vertical e consequentemente atingir o *U-Value* especificado para a região onde a construção será implantada.

Tabela 1: U-Fatores para as paredes de aço formadas a frio. Fonte: SFA (2008).

Dim. Perfil (mm)	Distância entre eixos (mm)	Isolamento do interior da parede	Isolamento do revest. contínuo	<i>U-Value</i>
38,1 x 88,9	600	R-13	R-3	0,082
38,1 x 88,9	600	R-13	R-5	0,071
38,1 x 88,9	600	R-15	R-3	0,078
38,1 x 88,9	600	R-15	R-5	0,067
38,1 x 88,9	600	R-19	R-5	0,064
38,1 x 88,9	600	R-21	R-5	0,062

2.1.5 Características sustentáveis do LSF

Segundo a SFA (2008) o termo sustentabilidade foi definido a cerca de trinta anos atrás, como "progresso que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades". Hoje, o crescimento da população, os recursos finitos e reconhecimento de anomalias no padrão climático possivelmente resultante da exaustão de recursos e combustão de gases de

combustíveis fósseis estão motivando arquitetos, construtores, designers e proprietários a exigir produtos que utilizam recursos com sabedoria. Esta consciência social e da realidade financeira com relação ao aumento dos custos de energia encurtou drasticamente o período de retorno para o investimento no desenvolvimento de alternativas sustentáveis, de modo que, em poucas palavras, vale a pena ser verde.

De acordo com Santos, Martins e Silva (2014) a procura para reduzir o consumo de energia em edifícios e o uso de materiais recicláveis aumentou nas últimas décadas. Na Europa, os edifícios são responsáveis para 40% do consumo de energia. O alto consumo fez com que a União Europeia estabelecesse vários objetivos no desempenho energético do edifício que deve chegar a quase zero em 2020. Ficou estabelecido o dever de se utilizar ainda mais fontes de energia renováveis e se estabelecer significativa melhora na eficiência energética dos edifícios.

Quando se fala em eficiência energética das edificações, sabe-se que na América do Norte o uso das edificações é responsável por um terço da energia consumida e por mais de 60% do consumo de eletricidade (KEELER e BURKE, 2010).

A CEF (2010) afirma que “a arquitetura deve ser tratada como uma envoltória reguladora, permeável e controlada entre os ambientes externo e interno, considerando-se o desempenho térmico das edificações por meio de soluções adotadas em projeto e com vistas a propiciar maior conforto térmico, tanto aos moradores do empreendimento como aos do entorno imediato (...)”.

De acordo com Roaf (2006), quanto maior a diferença de temperatura entre o lado externo e o interno de uma casa, melhor deve ser a qualidade das vedações. Segundo Corbella e Yannas (2003), os materiais utilizados na construção de um prédio regulam seu desempenho térmico e, por conseguinte, influenciarão no conforto térmico de seus usuários.

Um exemplo da aplicação de materiais eficientes na envoltória do edifício é apresentado na pesquisa sobre a análise energética do ciclo de vida de materiais de construção no deserto do Negev, onde Huberman e Pearmutter (2008) descartam o LSF para a região, uma vez que, além de serem incomuns para edifícios residenciais locais, foram considerados inadequados climaticamente para Negev. Sabe-se que a escolha do sistema construtivo deve avaliar sua eficiência frente ao clima da região.

De acordo com Amundaraim (2007), as paredes externas contribuem para o desempenho global de energia de uma casa e representam cerca de 25% do total de

perda ou ganho de calor. Ao melhorar as propriedades de isolamento, conseguem-se melhorias na sustentabilidade da construção.

De acordo com Santos, Martins e Silva (2014), reduzir a energia operacional usada em edifícios, mantendo o conforto térmico interno, é essencial para se alcançar uma etiqueta de sustentabilidade. A Figura 5 mostra a diminuição anual do uso do combustível para aquecimento devido a melhorias nos componentes do envelope para um edifício localizado em Kiruna. Comparando a solução inicial com o final melhorada, obteve-se uma redução da demanda de energia de 57%.

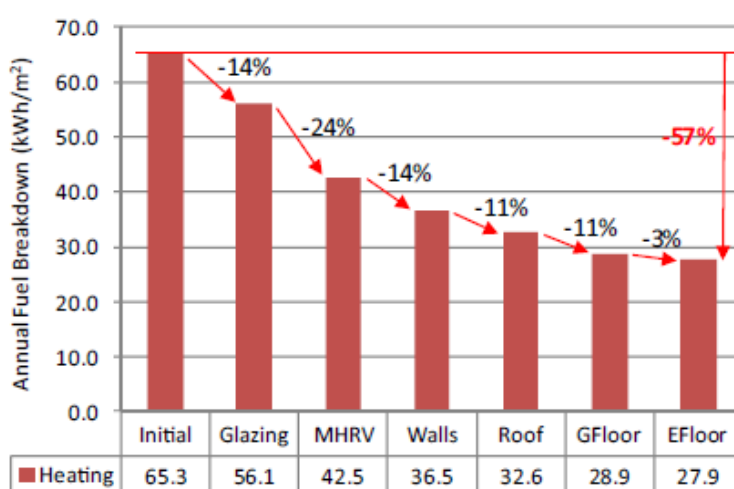


Figura 5: Energia operacional. Diminuição anual do consumo de combustível devido a melhorias com a redução por aquecimento mecânico. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

No entanto, para alcançar esse alto nível de sustentabilidade deve-se, por exemplo, minimizar as pontes térmicas e melhorar a inércia térmica dos painéis. Estes dois parâmetros tem grande influência sobre o comportamento térmico e eficiência energética dos edifícios de LSF. Várias estratégias estão disponíveis e podem ser aplicadas sozinhas ou simultaneamente (SANTOS, MATINS E SILVA, 2014).

De acordo com a SFA (2008), além do desempenho térmico, deve-se observar à sustentabilidade do sistema quanto à escolha dos materiais empregados. A avaliação do ciclo de vida (LCA) mede de forma abrangente e contabiliza o consumo de recursos e encargos ambientais associados a um produto durante a sua vida, desde a extração, fabricação, uso, desmontagem, reutilização e eliminação. Roaf (2006) estabelece algumas regras para escolha de materiais para uma construção:

- escolha o material mais natural possível com o mínimo ou nenhum processamento;
- escolha o material mais local possível com boa procedência; e
- escolha materiais que sejam duráveis e adequados à finalidade pretendida.

Na maioria das edificações, os materiais que contribuirão significativamente na energia incorporada são: aço, concreto, madeira, tijolos, cimento, agregados, vidro e argamassa. Estes materiais representam uma grande proporção do volume da maioria das edificações e o projetista pode determinar a energia incorporada ao prestar muita atenção às suas especificações. A escolha de materiais de fontes locais reduzirá a energia incorporada e as emissões em função da redução de transporte (ROAF, 2006).

No LSF, o aço aparece em grande quantidade e por esse motivo segue alguns comentários sobre sua vida útil.

Rocha (2011) comenta que as emissões de gases do efeito estufa (GEE), estão geralmente relacionadas ao desmatamento e à queima de combustíveis fósseis em motores veiculares, fornos industriais e termelétricas para a geração de energia elétrica. Todos esses gases são gerados na produção do aço, que utiliza ainda o coque de carvão mineral, que também é um combustível fóssil.

O carvão mineral é o combustível mais poluente, superando o petróleo e o gás natural (outros dois tipos de combustíveis fósseis). Na indústria siderúrgica o carvão mineral é usado na forma de coque para reagir com o minério de ferro (reductor) e produzir a liga metálica do aço.

Por ser muito poluente, a produção do aço segue uma política de melhorias que tem tido resultado ao longo do tempo. O rótulo ecológico “Aço Verde” é um selo identificador de produtos menos agressivos ao meio ambiente e no Brasil é fornecido pela ABNT. O selo é um mecanismo de implementação de políticas ambientais dirigido aos consumidores, auxiliando-os na escolha de produtos menos agressivos ao meio ambiente.

Segundo Rocha (2011), o “Aço Verde” é produzido com carvão vegetal. Esta é uma alternativa capaz de ajudar na mitigação das emissões de gases de efeito estufa por ser obtido da lenha de florestas plantadas. Algumas siderurgias brasileiras já utilizam o carvão vegetal em usinas no estado de Minas Gerais e na região de Carajás, que engloba Pará e Maranhão.

Contraria a esta iniciativa, Izida (2013) comenta que para sustentar a cultura do carvão vegetal para a produção de coque, deve ocorrer a expansão de projetos de monoculturas de árvores, principalmente eucalipto, que podem trazer consequências sociais e ambientais indesejadas. Após três reflorestamentos seguidos com eucaliptos, o solo se torna empobrecido demais para outras culturas. Além disso, como a cultura de eucalipto absorve um grande volume de água, a coexistência de outras espécies

próximas fica prejudicada, o que é agravado ainda pelo poder herbicida de suas folhas. Como consequência, os problemas sociais aparecem, como é o caso da cidade de Conceição da Barra (ES). Com quase 70% de seu território coberto por eucaliptos, a cidade possui um dos piores indicadores sociais do estado, mais de 100 córregos desapareceram e um grande êxodo das populações quilombolas ocorreu devido à exaustão do solo para sustentar as culturas de subsistências.

Izida (2013) completa que a expansão da produção do aço verde tem que resolver um problema sério de sustentabilidade. Apesar dos argumentos em favor desta tecnologia sustentarem que os problemas podem ser resolvidos com a renovação na produção de lenha de carvão vegetal, o controle da origem da matéria-prima e seu aproveitamento integral (recuperando o alcatrão e o bio-óleo para outros processos), não resolvem os problemas sociais e ambientais expostos.

Em contrapartida a produção pouco sustentável do aço virgem (produzido com carvão mineral ou carvão vegetal), tem-se a reciclabilidade do material. Segundo o CBCA (2013), o aço é um material 100% reciclável podendo retornar aos fornos sob a forma de sucata e se tornar um novo aço, sem perda de qualidade.

Esta característica faz dele um dos produtos mais reciclados no mundo. Sua transformação atende a indústria automotiva, construção civil, máquinas, equipamentos, etc. Os benefícios da reciclagem incluem a redução do uso de matérias-primas não renováveis e redução das emissões de gases do efeito estufa.

Em um estudo energético sobre a emissão de gases do efeito estufa, Cole (1998) obteve respostas sobre a eficiência dos sistemas construtivos. Comparou construções executadas com madeira, concreto e aço e concluiu que o sistema construtivo com aço é o mais sustentável. Na análise foi considerada além da produção industrial, a produção na obra, sendo que o tempo de obra e o transporte dos trabalhadores para o local são os maiores condicionantes para este resultado (Figura 6).

Outro estudo compara os impactos ambientais relacionados com os materiais estruturais (CARMODY e WEBER, 2007). Por este aspecto percebe-se um aumento significativo do impacto ambiental relacionado ao aço não advindo de produtos reciclados quando comparado com a madeira e o concreto como mostra a Tabela 2 que está fundamentada em dados de ACV (Avaliação do ciclo de vida) da ferramenta de avaliação *ATHENA Materiais Sustentáveis*. Essa análise relaciona somente à produção industrial e não a produção da obra como analisou Cole em 1998.

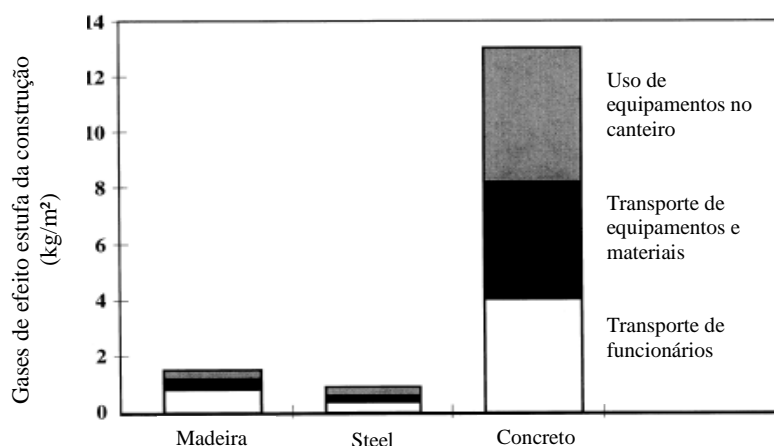


Figura 6: Emissões de gases de efeito estufa e energia associados a construção de sistemas estruturais alternativos. Fonte: Cole (1998).

Tabela 2: Impactos ambientais relacionados com a estrutura. Fonte: Carmody e Weber (2007).

	Madeira	Aço	Concreto
Energia total	Menor	140% mais	70% mais
Gases do efeito estufa	Menor	45% mais	81% mais
Poluição do ar	Menor	42% mais	67% mais
Poluição das águas	Menor	1900% mais	90% mais
Resíduos sólidos	Menor	36% mais	96% mais
Uso de recursos sustentáveis	Menor	16% mais	97% mais

Conclui-se então que a industrialização e a diminuição do tempo de obra são características importantes dos sistemas construtivos e quando levadas em consideração, tornam o LSF um sistema sustentável.

2.1.6 Projeto arquitetônico preliminar de LSF

Crasto, Freitas e Santiago (2012) comentam que é no projeto arquitetônico que as decisões tomadas representam mais de 70% dos custos da construção.

Meseguer (1991) completa ainda que, o projeto é responsável, em média, por 40 a 45 % das “falhas de serviço” em edifícios. Por isso, é fundamental que o projeto seja pensado em conformidade com todos os seus condicionantes, pois sistemas industrializados são incompatíveis com improvisações no canteiro de obras e a reparação dos erros pode acarretar em prejuízos tanto financeiros como de qualidade do produto final.

Os profissionais envolvidos no processo projetual devem conhecer o sistema LSF como um todo: processo construtivo, subsistemas, componentes, detalhes

executivos, interface entre os subsistemas, exigências normativas e prescritivas assim como suas características, vantagens e desvantagens.

Souza, Amparo e Gomes (2011) comentam que o LSF está passando por um processo de desenvolvimento técnico e de aceitação no mercado da construção civil nacional e que ainda existem deficiências no projeto, detalhamento e execução dos sistemas complementares de fechamento.

Segundo Mandolesi (1981) o trabalho de projeto nas construções industrializadas exige uma maior quantidade de detalhes além de uma considerável minuciosidade no mesmo. Isto é mais acentuado nas produções em massa, onde o encurtamento do tempo de fabricação ou a redução da quantidade necessária de materiais influem em alto grau na economia do produto. O processo construtivo racional antecede a industrialização e segue a mesma premissa.

É na elaboração do projeto arquitetônico preliminar que se especifica o sistema construtivo e demais características que nortearão as próximas fases e a execução dos projetos complementares. Para direcionar o início de projeto, segue uma revisão dos processos iniciais de projeto com foco nas características e normativas do LSF.

Segundo a NBR 13531 (ABNT, 1995) a etapa de levantamento (LV) é destinada á coleta das informações de referência que representem as condições preexistentes, do interesse para instruir a elaboração do projeto, podendo incluir dados físicos, planialtimétricos, cadastrais (edificações, redes, etc.), geológicos, hídricos, ambientais, climáticos e ecológicos, técnicos, legais, jurídicos, sociais, econômicos, financeiros, etc. O objetivo desta fase é também levantar um conjunto de informações normativas, bem como a definição dos padrões e critérios de desempenho (mínimo, intermediário e superior) apontados na NBR 15575 (ABNT, 2013).

A NBR 15575/2013 - Desempenho de edificações habitacionais e o DIRETRIZ SINAT Nº 003/2012 - Revisão 01 - Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”) são os principais documentos nacionais que garantirão o desempenho do LSF atualmente.

O SINAT – Diretriz Nº 003/2012 trata do sistema LSF destinado a unidades térreas, sobrados isolados e geminados e edifícios multifamiliares de até 05 pavimentos, destinados à construção de habitações. Define a características das estruturas, paredes (vedação vertical externa ou interna), pisos e coberturas e índices de desempenho para

cada subsistema. E não se aplica os ambientes de elevada agressividade ambiental, como atmosferas industriais e marinhas.

Os subsistemas convencionais, como fundações, esquadrias, instalações hidráulicas e elétricas e demais elementos ou componentes convencionais não são objeto desta diretriz, porém devem ser consideradas as interfaces entre subsistemas, como interfaces entre paredes e pisos, entre paredes e esquadrias e instalações.

O LSF apesar de possuir características que agregam grandes vantagens à edificação, tanto na etapa de construção, quanto no seu uso pelos habitantes, apresenta algumas limitações que devem ser observadas quando de seu emprego. O entendimento destas limitações auxilia o projetista a tirar maior proveito de suas vantagens, adequar melhor os custos, ter maior aproveitamento e melhorar a durabilidade da edificação.

2.1.7 Tipologias estruturais de LSF

No sistema LSF existe duas tipologias. Uma onde os painéis são estruturais e autoportantes e outra onde os painéis de vedação vertical não são autoportantes tendo função estrutural somente de resistência ao vento.

2.1.7.1 Painéis autoportantes em LSF

Existem basicamente três métodos de construção empregando o LSF com painéis autoportantes:

- Método “Stick”

Segundo Crasto, Freitas e Santiago (2012), neste método de construção os perfis são cortados no canteiro da obra, e painéis, lajes, colunas, contraventamentos e tesouras de telhados são montados no local. Como característica principal, não é necessário um local para a pré-fabricação do sistema.

- Método por painéis

De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012), painéis estruturais ou não estruturais, contraventamentos, lajes e tesouras de telhado podem ser pré-fabricados fora do canteiro e montados no local, assim como os fechamentos que são conectados no local com parafusos autobrocantes e autoatarraxantes. Esta metodologia aumenta consideravelmente a velocidade de montagem, facilita o controle de qualidade e o aumento da precisão dimensional devido às condições fabris de montagem minimizando o trabalho no canteiro de obras.

- Construção modulares pré-fabricadas

Lawson (2012) explica que as construções modulares são unidades completamente pré-fabricadas e podem ser entregues no local da obra com todos os acabamentos internos (revestimentos, louças sanitárias, bancadas, mobiliários fixos, metais, instalações elétricas e hidráulicas, etc.) e pontua algumas vantagens:- economia na produção em escala (unidades modulares semelhantes); - velocidade de construção (50% mais rápido quando comparado com o sistema de painéis); - alto nível de controle de qualidade através de fabricação fora do local (*off-site*);- perturbação mínima ao entorno durante a construção;- eliminação de resíduos no local; - equipamentos e serviços especializados podem ser testados na fábrica;- módulos podem ser movidos no futuro, com mudanças na demanda. A construção modular divide-se em quatro categorias:

Módulo com quatro lados (*Four sided modules*) - Nessa modalidade, quatro painéis são fabricados para formar quatro lados fechados criando espaços celulares que são projetados para transferir cargas através de suas paredes longitudinais (Figura 7). Os módulos são projetados combinando a carga vertical dos módulos e a ação do vento. A altura máxima dos edifícios é de 6 a 10 andares, dependendo da localização e exposição à carga de vento. No entanto, construções mais altas podem ser alcançadas quando módulos são combinados com um núcleo de aço pesado. São muito utilizadas em edifícios celulares, tais como hotéis, residências estudantis, edifícios residenciais e alojamentos de trabalhadores.



Figura 7: Módulo de quatro lados (composição escalonada). Executora Ayrshire Framing.

Figura 8: Módulos parcialmente abertos – Executoras Futureform e Ayrshire Framing. Fonte: Lawson (2012).

Módulos parcialmente abertos (*Partially open-sided modules*) - Os módulos são concebidos com os lados parcialmente abertos através da introdução de cantos e estruturas leves intermediárias e painéis rígidos no piso (.

Figura 8). Os módulos criam diferentes formas e espaços mais amplos quando comparados à tipologia descrita anteriormente. São muito utilizados em alojamentos de trabalhadores, pequenos apartamentos, hotéis e áreas comuns em residências estudantis.

Módulos abertos (*Open-sided - corner supported - modules*) - Os módulos são concebidos para serem totalmente abertos em um ou ambos os lados com transferência de cargas para as colunas de canto. São colocados lado a lado para criar maiores espaços abertos. Muito utilizado em hospitais, escolas, etc. (Figura 9).



Figura 9: Instalação de módulos abertos para um hospital. Executora Yorkon. Fonte: Lawson (2012).

Módulos suportados por uma estrutura primária - (*Module supported by a primary structure*) - As unidades modulares são projetadas para serem apoiadas em uma estrutura primária de concreto ou de aço pesado (Figura 10). Edifícios com esta conformação são normalmente de uso misto, com unidades residenciais, áreas comerciais e estacionamento.



Figura 10: Instalação de módulos apoiados no quadro de aço. Executoras Yorkon e Joule. Fonte: Lawson (2012).

2.1.7.2 Painéis não portantes em LSF (vedação vertical externa)

O fechamento de fachadas com LSF combinado com uma estrutura principal portante é bastante corriqueiro em diversos países chegando a reduzir o peso próprio do edifício sugerindo em alívio na estrutura principal e nas fundações (Figura 11) (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO 2012).



Figura 11: Edifício Nuffield Hospital, Inglaterra. Fonte: METSEC, 2011.

NASFA (2014) comenta que as paredes externas podem ser executadas com maior facilidade em grandes alturas, assim como as janelas e detalhes arquitetônicos. Este tipo de formação melhora a resistência ao fogo, o desempenho acústico e térmico quando utilizadas mais camadas de revestimento.

No Brasil, esse tipo de sistema ainda é pouco utilizado na construção civil já que o conhecimento dos métodos de montagem é fundamental para se projetar elementos de fixação, juntas, a movimentação higrotérmica e a movimentação da estrutura. (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012).

Geralmente a estrutura principal do edifício é dimensionada sem que os fechamentos tenham qualquer responsabilidade estrutural global (suportar cargas e estabilização). A responsabilidade estrutural do painel é de suporte de seu peso próprio, resistência às forças de vento e impactos (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012).

Santiago (2008) comenta que os painéis externos em LSF podem contribuir com o contraventamento horizontal da estrutura principal e quando se considera o papel estrutural do LSF no dimensionamento consegue-se a diminuição do comprimento de flambagem dos pilares, resultado da presença de travamentos horizontais nesses painéis. Existem duas tipologias de painéis não portantes:

- Método embutido (*Infill*)

De acordo com a METSEC (2011) o método embutido consiste em painéis externos que são construídos entre os pisos do quadro estrutural primário de um edifício e que fornecem apoio ao sistema de revestimento (Figura 12). O dimensionamento e espaçamento dos perfis de LSF dependerão do cálculo estrutural que deve ser compatível com a especificação dos materiais de revestimento.

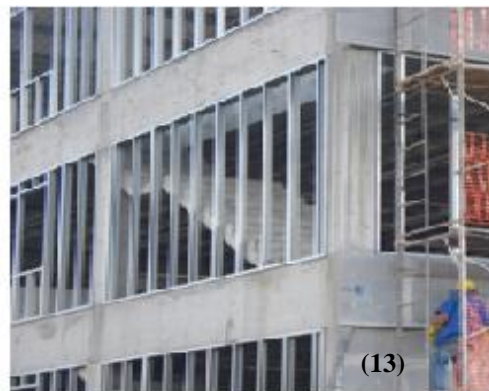
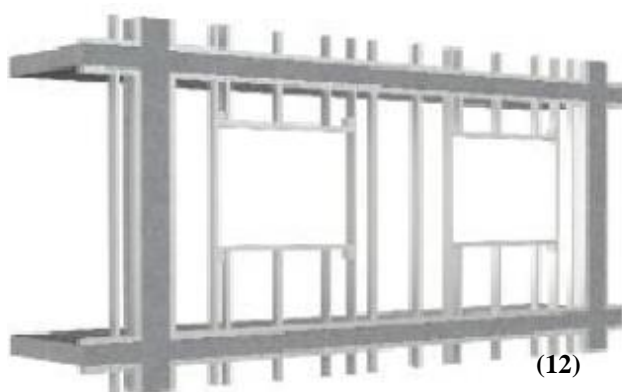


Figura 12: Imagem de uma parede de vedação embutida. Fonte: MetSec (2011).

Figura 13: Edificação industrial com estrutura principal de concreto e painéis embutidos de LSF. Espaçamento de 60cm entre eixos. Pinhais/Pr. Fonte: Autor.

As cargas dos painéis são descarregadas na estrutura imediatamente abaixo, dessa forma, o sistema de fechamento não oferece limitação ao porte do edifício e nem demanda a utilização de sistemas auxiliares de sustentação e de transmissão de sua carga para a estrutura principal (METSEC, 2011). É muitas vezes uma solução viável pra desvios e erros de prumada da estrutural principal (Figura 13).

Segundo Crasto, Freitas e Santiago (2012), os painéis de fechamentos em LSF embutidos, podem ser concebidos com ligações rígidas entre os seus elementos e a estrutura principal ou não rígidos de forma a permitir o livre deslocamento entre eles. Em ambos os casos, a carga vertical do fechamento é transmitida para a viga ou laje localizada imediatamente abaixo.

Quando o fechamento em LSF é executado com ligações rígidas há sempre a transmissão de carregamentos da estrutura principal, em função de seus deslocamentos, para a estrutura do painel em LSF. Tal comportamento deve ser levado em conta nos painéis e na estrutura principal do edifício (SCHAFER, 2003).

No caso de se optar pela liberdade de deslocamento, a conexão dos montantes com a guia superior deve ser feita utilizando-se peças ou montagens específicas que

permitam o deslocamento na forma e grandeza propostas pela concepção e dimensionamento estrutural (CRASTO, FREITAS E SANTIAGO, 2012).

Os painéis não rígidos são os mais utilizados para o detalhamento das vedações externas e visam permitir o deslocamento livre entre a estrutura do edifício e a estrutura do fechamento. Pode-se optar pelo uso de montagem de LSF com espaço livre no topo dos montantes. Esse tipo de montagem permite a movimentação vertical sem transmissão de esforços para os elementos do painel (SCHAFER, 2003).

De acordo com Lawson (2012) a guia superior (secção em U) que permite o movimento do painel em relação às vigas verticais (seção em C). Movimentações de 2 a 3 mm por andar podem ocorrer ao longo do tempo, bem como, movimentos normais estruturais que ocorrem em todos os quadros, provocados principalmente, pela carga e descarga do piso.

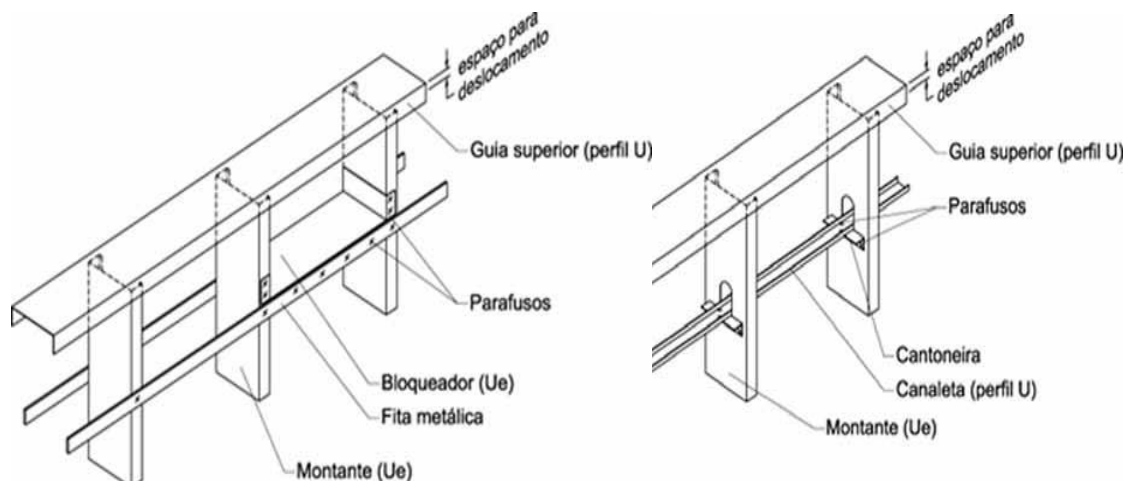


Figura 14: Travamento superior com bloqueadores e fitas. Fonte: Crasto, Freitas e Santiago (2012).

Figura 15: Travamento superior com canaleta e cantoneiras. Fonte: Crasto, Freitas e Santiago (2012).

De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012), a montagem da parte superior dos painéis é responsável por permitir sua trabalhabilidade dentro do quadro estrutural principal. Existem várias formas de execução de travamento para montantes com extremidade superior não parafusada. Uma delas é por meio de bloqueadores e fitas instalados horizontalmente a uma distância aproximada de 150 mm do topo do painel (Figura 14). Outra forma de execução é o uso de canaletas que são perfis U de menor seção, combinados a cantoneiras que são perfis L como mostra o detalhe na Figura 15

A Metsec é uma das empresas que desenvolveu um sistema com peças que possuem furos oblongos para permitir a deflexão da estrutura principal (Figura 16). Os parafusos estruturais que fixam os montantes à guia superior são instalados nos furos oblongos da mesa da guia, permitindo o deslocamento vertical da estrutura e mantendo

o alinhamento dos montantes, sendo muito mais rápido e mais fácil de instalar do que suportes de deflexão convencionais como bloqueadores e cantoneiras mostrados na Figura 14 e Figura 15.

A montagem com bloqueadores, fitas, cantoneiras e canaletas pode ser executada no Brasil, já que as peças são facilmente encontradas no mercado. Peças com furos oblongos são comuns no exterior e dificilmente encontradas no mercado nacional apesar das facilidades de montagem e instalação.



Figura 16: Guia superior com furos oblongos. Fonte: MetSec (2014).

- Método Contínuo (*out side*)



Conecção da parede contínua na estrutura principal. Fonte: LAWSON, 2012.



Peça de ligação do painel na estrutura. Fonte: METSEC, 2011.

Figura 17: Método contínuo de fachada com empilhamento de painéis (a). Detalhe de fixação (b). Peça de fixação dos painéis na estrutura principal (c). Fonte: Catálogo Metsec (2011).

De acordo com a Lawson (2012) os fechamentos para fachadas em LSF podem ser executados com painéis contínuos externos, concebidos como uma “pele de revestimento”. Os fechamentos contínuos não possuem, usualmente, função estrutural

no edifício, sendo responsáveis apenas por resistir às cargas de vento, ao seu peso próprio e dos acabamentos de fachadas (Figura 17a).

Para a execução do fechamento contínuo são necessárias peças exclusivas para conexão dos painéis de LSF com a estrutura principal do edifício. Tais peças são executadas em aço galvanizado, podendo ser rígidas ou não rígidas geralmente com furos oblongos como mostra o detalhe na Figura 17b e Figura 17c (LAWSON, 2012).

Os painéis contínuos podem ser executados de modo a transmitir todo o carregamento vertical do sistema de fechamento diretamente para a fundação, descarregando na estrutura do edifício para alturas menores ou descarregando o peso na estrutura principal por meio de fixadores nas lajes entre pisos (LAWSON, 2012).

2.2 COMPONENTES DO PAINEL DE VEDAÇÃO VERTICAL

A revisão bibliográfica sobre os componentes esta centrada no objeto de estudo que são as paredes verticais externas e seus diversos elementos e tem como objetivo levantar requisitos, critérios, e particularidades, bem como, suas características sustentáveis para nortear as especificações em projeto e entendimento dos subsistemas.

2.2.1 Quadro estrutural

De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012) a modulação estrutural é dimensionada para compor com as chapas de revestimento. Por isso geralmente, as placas possuem largura de 1,20 m e a modulação é 300 mm, 400 mm ou 600 mm.

Os perfis de aço galvanizado empregados no LSF são os responsáveis pela estabilidade e resistência estrutural das edificações. São obtidos através da imersão do aço cru em zinco ou mesmo em uma liga contendo zinco, formando uma película capaz de proteger o perfil da ação de corrosão, o que aumenta sua durabilidade. Os tipos de perfis mais utilizados são as guias e montantes enrijecidos, cartolas e cantoneiras e variam de 0,8 mm até 2,9 mm de espessura (SANTIAGO, 2008).

Segundo o SINAT – Diretriz N° 003/2012) o perfil estrutural de aço formado a frio é obtido por dobramento em prensa dobradeira de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente conforme a NBR 6355 (ABNT, 2003).

Os montantes, também denominados perfis U tem a função de transmissão do carregamento a que estão submetidos, através de sua alma, para o solo. Para que a transmissão ocorra de maneira adequada, os montantes devem ser posicionados de forma tal a serem coincidentes no caso de edificações com mais de um pavimento, bem como seu espaçamento, dimensionamento e espessura da chapa devem ser especificados conforme o carregamento a que cada montante estará submetido (RODRIGUES, 2006).

O SINAT – Diretriz N° 003/2012 exige dos perfis requisitos mínimos e estipula indicadores de conformidade:

- Resistência mínima de escoamento - 230 MPa como consta na NBR 6673 (ABNT, 1981) que determina as propriedades mecânicas à tração de produtos planos de aço a proteção contra corrosão especificando o tipo de revestimento.

- Tipo e espessura do revestimento – existem dois tipos de revestimento.

- * zincado por imersão a quente – a massa mínima de revestimento nas duas faces é de 275 g/m^2 (Z275) para atmosferas rurais e urbanas e 350 g/m^2 (Z350) para atmosferas marinhas, distantes até 2.000 m da orla marítima segundo a NBR 7008-1 (ABNT, 2012) que trata das chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente;

- * ligas de alumínio zinco por imersão a quente ou outros revestimentos equivalentes com massa mínima de 150 g/m^2 (AZ150) segundo NBR 15578 (ABNT, 2008) que trata da especificação de bobinas e chapas de aço revestidas com liga 55% alumínio - zinco pelo processo contínuo de imersão a quente.

- Espessura nominal mínima para perfis U simples e enrijecidos de $\geq 0,80 \text{ mm}$ e perfis cartola com espessura $\geq 0,65 \text{ mm}$ segundo a NBR 15253 (ABNT, 2014) que trata dos requisitos gerais dos perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações.

A durabilidade do sistema construtivo está ligada à agressividade ambiental, às propriedades inerentes dos elementos e a interação entre eles. A especificação da proteção do aço deve ser compatível com a agressividade do meio onde estará inserida a construção. Os proponentes do sistema construtivo deverão apresentar as condições de durabilidade específicas para cada atmosfera, orientando o usuário, informando os prazos de vida útil e as condições de manutenção (SINAT – Diretriz N° 003/2012).

O SINAT – Diretriz N° 003/2012 comenta ainda sobre a resistência à corrosão de dispositivos de fixação (parafusos e chumbadores). A especificação é feita considerando o sistema de proteção contra corrosão e também as seguintes condições de

exposição à névoa salina: - parafusos aplicados entre perfis metálicos para a fixação dos quadros estruturas e os chumbadores de fixação desses quadros à fundação devem ser submetidos à exposição de 240 horas de névoa salina.

Contra a corrosão bimetalica – interfaces entre peças metálicas - deve ser evitado o desenvolvimento de corrosão galvânica, verificando-se se não há este tipo de risco, como por exemplo, o contato de tubulações de cobre ou esquadrias de alumínio com o aço zincado (SINAT – Diretriz N° 003/2012).

O SINAT – Diretriz N° 003/2012 aponta requisitos de controle de aceitação dos perfis metálicos: - espessura dos perfis (especificação em projeto e conferência com micrômetros); - tipo e espessura do revestimento de proteção (Z275, Z350 ou A150), conforme especificação de projeto e entrega do relatório de ensaio ou certificado de conformidade e por fim, conferência em obra pelo método magnético.

2.2.2 Revestimento externo, revestimento interno e proteção contra a umidade

Carmody e Weber (2007) comentam que funcionalmente o material de revestimento protege a estrutura das intempéries e que deve ser selecionado com base no custo, estética, durabilidade, requisitos de manutenção, e impacto ambiental. Nenhuma das opções está livre de conservação, mas existem soluções que requerem menos manutenção. Em países onde as temperaturas são extremas e se espera alto desempenho térmico e acústico, são usadas camadas externas com tijolos, poliuretano expandido, madeira, etc. e revestimento interno com duas chapas de gesso (Figura 18).

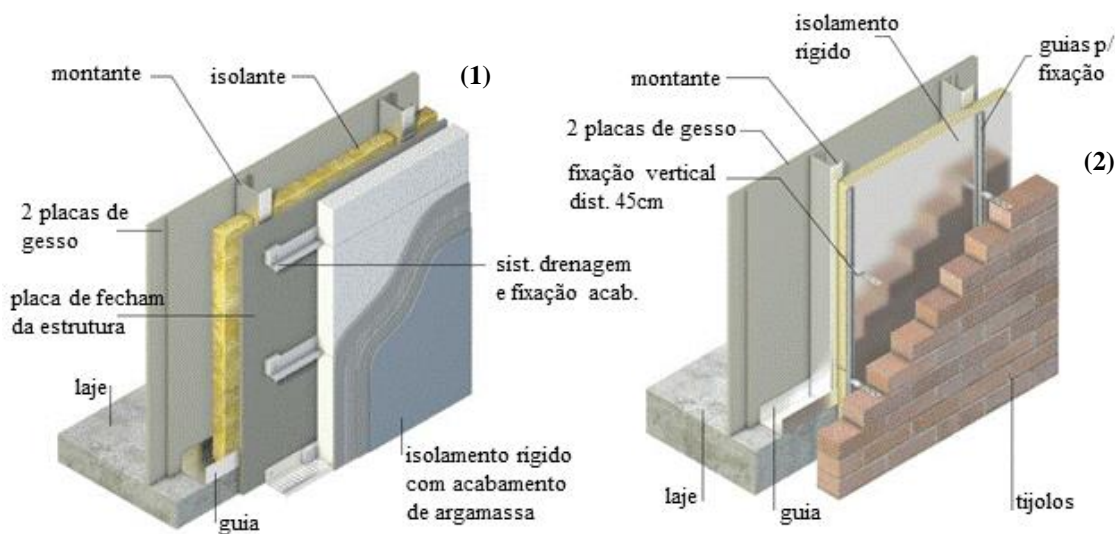


Figura 18: Paredes de LSF. (1) acabamento com poliuretano (isolamento rígido) e (2) tijolos.
Fonte: Metsec (2014).

De acordo com Carmody e Weber (2007), existem materiais mais sustentáveis quando comparados entre si. A Tabela 3 fornece os dados do impacto ambiental dos principais materiais utilizados como revestimento em painéis de LSF e apresenta um conceito relacionado ao ciclo de vida (*Life Cycle Thinking* - LCT) que analisa cinco aspectos: consumo de energia, poluentes gerados na produção, durabilidade do produto, potencial para futura reciclagem, facilidade de instalação e potencial para liberação de gases no interior do edifício.

Tabela 3: Alternativas de revestimento e suas características. Fonte: Carmody e Weber (2007).

Alternativas	Expectativa de vida do produto (anos)	LCT	Facilidade de instalação	Custo
Estuque	50 (depende de manutenção)	Bom	Padrão	\$ 3,41
Tijolo	100 +	Bom	Padrão	\$ 8,23
Madeira	25 – 75 (depende manutenção)	Bom	Padrão	\$ 3,58
Placa cimentícia	50	Melhor	Pode exigir treinamento (de corte e aplic. de selantes)	\$ 2,15
Alumínio	25 - 50	Bom	Padrão	\$ 2,60
Siding vinílico	25	Típico	Padrão	\$ 1,71
Compensado	10 - 25	Típico	Padrão	\$ 1,91
OSB resinado e plástico	20 - 30	Bom	Padrão	n/a

Notas: Informações de custo baseado em Means Cost Works 2004 de Minnessota e o Modelo Energético produzido no Visual DOE 3.1.

Escala relativa (LTC): - típico indica um padrão de indústria regular; bom um passo acima da média e melhor para vários passos acima da média.

Segundo Carmody e Weber (2007) o revestimento é a primeira linha de defesa contra a umidade e a correta instalação e manutenção do sistema, independentemente do tipo, é fundamental para a durabilidade da construção como um todo. Isso inclui intermitentes reparos e manutenção continuada, como pintura e concertos pontuais.

Carmody e Weber (2007) apresentam a análise dos cinco aspectos relacionados ao ciclo de vida (*Life Cycle Thinking* - LCT) pontuando comentários sobre alguns componentes:

- Consumo de energia não renovável - as alternativas como a madeira e materiais produzidos com base de madeira têm o menor consumo de energia primária e energia incorporada total e, sustentavelmente, o menor impacto ambiental global. No entanto, exige mais manutenção ao longo do tempo, a fim de manter a sua integridade.

- Poluentes gerados na produção - tijolo, aço ou alumínio e placas de fibrocimento têm os mais altos índices de poluição da água e do ar (nessa ordem), causados durante a extração e fabricação. O siding vinílico fica numa situação intermediária mas é considerado um risco pela geração de poluentes (dioxinas) durante

um incêndio e pelo processo de lixiviação soltado poluentes no ar e na água. A madeira se é proveniente de florestas geridas de forma sustentável não poluem o ar e a água com a erosão, sedimentação, e práticas de colheita pobres.

- Potencial para liberação de gases no interior do edifício - seus efeitos sobre o ambiente interior são mínimos. Uma vez que são aplicados na face externa.

- Durabilidade do produto - as placas de fibrocimento, com garantias de mais de 50 anos e um ciclo de manutenção de pintura de 5 a 7 anos, é a seleção mais durável, sendo que as juntas e selantes são componentes importantes na durabilidade do sistema. O aço ou alumínio com revestimentos de membranas hidrófugas têm um ciclo de vida longo, se devidamente mantido. O siding vinílico, embora durável, pode descolorir e perder plastificantes ao longo do tempo tornando-se frágil, mas exigem pouco em termos de manutenção. A madeira requer manutenção para preservar suas características e garantir um ciclo de vida completo, com a pintura adequada e reparos pode durar décadas. Manufaturados de madeira como o OSB requerem mais manutenção, pintura e costuras de vedação para garantir o desempenho total do ciclo de vida.

- Potencial para futura reciclagem - o aço e o alumínio são altamente recicláveis, e são produzidos com alto teor de conteúdo reciclado, reduzindo assim a sua dívida alta de energia inicialmente embutida. A placa de fibrocimento pode ser retificada e utilizada, em alguns casos, o tijolo pode ser recuperado (limpo e reutilizado), a madeira é biodegradável exceto com a presença de manchas e tintas que afetam sua reutilização e limitam o uso e o siding vinílico que pode ser reciclado, dependendo da qualidade do PVC.

- Facilidade de instalação - todas as seleções examinados são comuns e seus métodos de instalação padrão, embora a instalação de placa de fibrocimento exija treinamento adicional para cortar o material e vedação adequada das juntas.

Carmody e Weber (2007) resumem as considerações pontuando que com relação ao custo e comentam que o siding vinílico é amplamente utilizado, porque tem o menor custo inicial, baixa manutenção, e é relativamente durável. A placa cimentícia é muito popular devido ao seu custo relativamente baixo e longevidade, já a madeira custa 109% a mais que o siding vinílico e é 40% mais cara que a placa cimentícia e conclui que, tal como acontece com muitos materiais de construção, aqueles com altos custos iniciais (tijolo, estuque e madeira) são mais duráveis.

Quanto à expectativa de vida do produto, os materiais de cimento, são as mais duráveis, têm vida útil mais longa que o esperado e com manutenção apropriada podem

durar mais de 100 anos. O siding vinílico tem uma vida útil esperada de 25 anos, no entanto, é substituído antes deste prazo por parecer menos apresentável e não possuir manutenção como a pintura por exemplo. Como a placa de fibrocimento tem o dobro da vida útil de siding vinílico, o seu custo ao final da vida é menor. Da mesma forma que o custo do estuque é o dobro do siding vinílico e dura o dobro do tempo tornando-se mais barato ao longo da vida da edificação (CARMODY e WEBER, 2007).

Carmody e Weber (2007) concluem que um resultado estético bom, de baixo custo e que possua características sustentáveis pode ser conseguido com a placa cimentícia, que possui um ótimo custo benefício, durabilidade e baixo impacto ambiental com acabamento em estuque que também possui custo baixo, fácil manutenção e tempo de vida previsto de mais de 50 anos.

Carmody e Weber (2007) apresentam ainda uma relação de orientações gerais para a seleção de um sistema de revestimento:

- escolher um sistema que vai ser reparado apenas uma vez antes do prazo de 30 anos;
- comparar os custos do ciclo de vida para o revestimento, incluindo o custo de instalação, manutenção e de substituição;
- usar produtos que vêm de fontes sustentáveis, feitos com material reciclado ou resíduos para reduzir os impactos ambientais globais;
- usar produtos recicláveis.

O painel constante do experimento levou em consideração os argumentos apontados por Carmody e Weber (2007) e utilizará a membrana hidrófuga para proteção do quadro estrutural leve com fechamento externo de placa de fibrocimento e estuque sintético (base-coat).

Segue revisão bibliográfica somente sobre os subsistemas e componentes que serão utilizados nos painéis abordados na dissertação.

2.2.2.1 Placa cimentícia

De acordo com Medeiros (2014), no comércio nacional a principal opção disponível para fechamento de vedações externas em LSF é a placa cimentícia que é fabricada com cimento Portland, agregados e geralmente fibras de celulose ou sintéticas. Há diferenças entre as placas disponíveis no mercado que interferem diretamente nas propriedades e desempenho. Uma das características que marca esta diferença é a capacidade de absorção de água, que varia de fabricante para fabricante.

As placas cientíssimas utilizadas em vedações de fachada devem ser protegidas para evitar a movimentação higroscópica que pode provocar fissuras. O tratamento das juntas por si só não elimina a necessidade de proteção das placas contra umidade. Em termos gerais, quanto maior a capacidade de absorção de água da placa, maior o potencial de movimentação e mais eficiente deve ser esta proteção. No mercado existem placas com teor de absorção de 6% enquanto outras apresentam absorção superior a 20% (MEDEIROS, 2014).

As placas são comercializadas normalmente com 1,20 m de largura e comprimentos que variam de 2,00 m, 2,40 m e 3,00 m. As espessuras também variam (6 mm, 8 mm, 10 mm, 12,5 mm e 15 mm) com peso varia entre 16 e 17 Kg/m².

As placas também são diferentes com relação ao tipo de reforço utilizado para resistir à flexão e permitir um manuseio sem ruptura. Há placas que possuem fibras de celulose dispersas na matriz cimentícia e outras que possuem telas de fibra de vidro incorporadas à superfície. A NBR 15.498 - Placa plana cimentícia sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2007) estabelece índices que devem ser ensaiados e declarados pelos fabricantes e explorados pelos projetistas garantindo o desempenho das fachadas (Tabela 4) (SINAT – Diretriz N° 003/2012).

Tabela 4: Requisitos para caracterização das placas cimentícia. Fonte: SINAT – Diretriz N° 003/2012.

Característica /Método de avaliação	NBR 15.498 - Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2014.
Classificação	Classe A – para uso externo e interno em áreas molháveis Classe B – para uso interno em áreas secas
Resistência mecânica (resistência à tração na flexão)	A média dos resultados de ensaio realizados nas duas direções deve ser: Classe A - Categoria 2 > 4MPa Categoria 5 > 18MPa (condição saturada) Classe B – Categoria 2 > 7MPa; Categoria 5 >22MPa (condição de equilíbrio)
Reação ao fogo – NBR 9442	Materiais Classe I (incombustível) a Classe II-B (combustível com índice de propagação de chamas menor que 25) (critério adotado da CB – IT 10, 2001)
Permeabilidade à água	Baixa / em situações de ensaios pode aparecer traços de umidade na face inferior das placas, porém sem surgimento de gotas de água
Absorção de água	$A \leq 25\%$
Durabilidade: resistência após ciclos de imersão em água e secagem	A resistência à flexão após ensaio não deve ser inferior a 70% da resistência de referência
Durabilidade: resistência à água quente	A resistência à flexão após ensaio não deve ser inferior a 70% da resistência de referência
Variação dimensional em função de gradientes hidrotérmicos	A variação dimensional da chapa, considerado o tratamento empregado nas juntas, não pode permitir a ocorrência de falhas, como fissuras, destacamentos e descolamento superior a h/300, conforme critério definido para a resistência à ação de calor e choque térmico.

O SINAT – Diretriz N° 003/2012 aponta requisitos de controle de aceitação no canteiro de obras: - aspecto (inspeção visual verificando a ausência de ondulações); - tolerâncias geométricas conforme a NBR 15.498 (utilização de uma trena); verificação da resistência mecânica, absorção de água e variação hidrocópica (exigir relatório de ensaio ou certificado de conformidade conforme indicado em projeto).

A placa cimentícia necessita de componentes de fixação (parafusos) e vedação para as juntas entre placas (juntas dissimuladas) e selantes para as juntas visíveis (juntas de dilatação). O SINAT – Diretriz N° 003/2012 aponta requisitos para os componentes da placa cimentícia:

- parafusos - para fixação das chapas externas aos quadros estruturais em ambientes rurais, os parafusos devem ser submetidos à exposição de 240 horas de névoa salina; em ambientes urbanos, industriais leves, ou a mais que 2.000 metros da orla marítima, 480 horas; parafusos para fixação de chapas externas aos quadros estruturais em ambientes marinhos, 720 horas.

- selantes – apresentar informações sobre o alongamento, resistência de ruptura à tração antes e após ciclos de envelhecimento, dureza inicial (1 a 6 meses a 20°C), resistência à umidade, resistência aos raios ultravioletas e produtos químicos, temperatura de trabalho em °C e tempo de cura em horas.

- massa para preenchimento das juntas dissimuladas – apresentar o teor de resina, aptidão para dissimular fissuras, craqueamento / fissuração e retração.

- fita ou tela utilizada em conjunto com a massa nas juntas dissimuladas – dimensões e resistência à tração.

2.2.2.2 Gesso acartonado

O gesso é um material que possui vários usos. É de rápida e fácil instalação, ótimo isolante acústico e térmico, incombustível, leve e de baixo custo.

De acordo com o SINAT – Diretriz N° 003/2012 as chapas de gesso são fabricadas industrialmente mediante um processo de laminação contínua de uma mistura de gesso, água e aditivos entre duas lâminas de cartão, onde uma é virada sobre as bordas longitudinais e colada sobre a outra.

As chapas possuem 1,20 m de largura, comprimento variando de 1,80 a 3,0 m e espessuras de 6,0, 6,5, 9,0, 12,5 e 15 mm, sendo a de 12,5 mm, a mais utilizada. Há três principais tipos de chapas: Standard (ST), para uso geral; Resistente à Umidade (RU),

também conhecida como “chapa verde”; e Resistente ao Fogo (RF), para áreas que exigem maior resistência a incêndios. (NBR 14715/1 ABNT, 2010).

De acordo com o SINAT – Diretriz N° 003/2012, os parafusos aplicados na fixação das chapas internas de revestimento dos quadros estruturais de áreas secas devem ser submetidos à exposição de 96 horas de névoa salina.

A NBR 14715 (ABNT, 2010) - Chapas de gesso para drywall aponta métodos de ensaio e requisitos que devem ser observados nas chapas de drywall: - aspecto, resistência mínima a ruptura na flexão; - dureza superficial; - absorção máxima de água; - absorção superficial máxima de água para chapa resistente a umidade e na parte 2, os métodos de ensaio. Existe ainda um conjunto de normas que determinam a qualidade do gesso acantonado.

A NBR 15758 (ABNT, 2009) - Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall, Projeto e procedimentos executivos para montagem apresenta na parte 1, os requisitos para sistemas usados como paredes; na parte 2 os requisitos para sistemas usados como forros e na parte 3, os requisitos para sistemas usados como revestimentos.

O SINAT – Diretriz N° 003/2012 aponta requisitos de controle de aceitação das chapas de gesso para drywall no canteiro de obras: - aspecto (inspeção visual para a verificação de possíveis ondulações ou manchas); - tolerâncias geométricas (conforme a NBR 14715 com a utilização de uma trena); resistência mecânica, absorção de água e variação hidrocópica (exigir a entrega do relatório ou certificado de conformidade).

O Brasil ainda conta com o PSQ-Drywall, vinculado ao Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) do Ministério das Cidades, que avalia a conformidade dos componentes do sistema drywall segundo as normas técnicas brasileiras (PSQ DRYWALL, 2014).

2.2.2.3 Membrana Hidrófuga

De acordo com a LP Brasil (2014), a membrana hidrófuga é fabricada com fibras de polipropileno unidas através de um processo de centrifugação. É utilizada em paredes externas e onde exista a necessidade de respiro e bloqueio da umidade. Atua como barreira contra o vento, poeira e permite a saída do vapor d'água do interior das paredes evitando o acúmulo de umidade e a proliferação de fungos.

Segundo o SINAT – Diretriz N° 003/2012 a membrana impermeáveis são recomendadas para vedações que delimitem áreas molháveis e molhadas. A impermeabilização deverá ser feita com mantas ou membranas apropriadas para este

fim, na interface entre a base dos quadros estruturais e o piso e nas laterais das paredes até a altura mínima de 20 cm e completa informando que o fornecedor deve apresentar a gramatura, ensaio de passagem de vapor e absorção de água.

É comercializada geralmente em rolos com 0,90 m 1,30 m e 2,70 m de largura e na instalação deve ocorrer uma sobreposição de 15 cm. Então, quanto maior a largura, menos sobreposições e consequentemente menor desperdício.

2.2.3 Isolamento instalado no interior da parede

De acordo com Carmody e Weber (2007), o isolamento é uma parte essencial de qualquer habitação e pode ser em forma de manta, enchimento solto, pulverizado em espuma ou espuma rígida. Um sistema de isolamento bem especificado e executado vai ajudar a reduzir a entrada de ar, a transferência de calor e controlar a umidade. Todos esses fatores precisam se unir para produzir um ambiente confortável e saudável.

Carmody e Weber (2007) analisaram o custo, energia e impactos ambientais dos materiais de isolamento mais utilizados (Tabela 5) e comentaram sobre suas características.

Tabela 5: Isolamentos, suas características sustentáveis e custo. Fonte: Carmody e Weber. (2007)

Alternativas	Custo	Energia (R-valor por pol)	Indoor Air Quality (IAQ)	Expectativa de vida (anos)	Life cycle thinking (LTC)	Facilidade de instalação
Manta de fibra de vidro	0.03	3.2	típico	15	típico	típico
Enchimento de celulose soprado	0.02	3.7	bom	15	bom	típico
Fibra de vidro soprada	0.04	2.2	bom	15	típico	típico
Polisocianurato ou polyisocyanurate aplicados no local	não avaliado	3.6 – 5.0	melhor	15-30	melhor	requer treinam.
Placas rígidas extrudadas (XPS)	0.14	5.0	típico	10-15	típico	típico
Placas rígidas expandidas (EPS)	0.13	3.85	típico	15	bom	típico
Placas rígidas polisocianurato (PIR)	0.09	7.2	típico	15-30	melhor	típico

Notas: Informações de custo baseado /sq.ft/R (materials e labor).

Escala relativa (LTC) e (IAQ): - típico indica um padrão de indústria regular; bom um passo acima da média e melhor para vários passos acima da média.

A lã de vidro, mineral, e de tecido, os resíduos têxteis, o asfalto e o papel tratado obtém sua propriedade de isolamento por aprisionamento do ar entre as fibras. O

enchimento de celulose (papel reciclado desfiado) e a fibra de vidro soprada são geralmente aplicados na horizontal (em forros e sótãos) ou no preenchimento de pequenos espaços verticais. Possuem baixa energia incorporada e elevado grau de reciclabilidade. O isolamento de poliuretano ou polisocianurato sob a forma de espuma ou pulverizado no local oferece alto desempenho térmico e reduz o vazamento de ar que pode ocasionar perda de calor (CARMODY e WEBER, 2007).

Os isolamentos rígidos extrudados (XPS), expandidos (EPS) e de polisocianurato (PIR), são comercializados em chapas e possuem alta energia incorporada desde a extração até a produção, mas oferecem o melhor desempenho, exigindo assim, menos material. São mais eficientes quando possuem uma folha reflexiva instalada ao lado de uma câmara de ar. O poliestireno extrudado utiliza o CFC, enquanto alguns poliisocianuratos utilizam HCFC e outros agentes alternativos (CARMODY e WEBER, 2007). Segundo o Protocolo de Montreal (1987) o CFC (clorofluorocarboneto) é a principal substância destruidora da camada de ozônio, amplamente utilizado entre as décadas de 80 e 90 na indústria de produtos e serviço, teve o consumo banido em 2010. O hidroclorofluorcarbono (HCFC) foi desenvolvido como alternativa de mercado para substituir o uso dos CFCs.

De acordo com Carmody e Weber (2007) o preenchimento solto e as mantas tem um baixo custo quando comparadas às placas rígidas, mas complementa afirmando que o investimento inicial (aumento da espessura ou escolha por tipos mais eficientes) pode ser recuperado ao longo do ciclo de vida do edifício, através da redução dos custos de aquecimento e resfriamento.

Carmody e Weber (2007) comentam sobre a qualidade do ar e explicam que se o material for deixado em repouso em cavidades da parede e sótão, não representam uma ameaça para a saúde humana, mas durante a aplicação podem potencialmente libertar fibras no ar durante o manuseio, principalmente a lã de vidro e a lã de rocha.

Quanto à expectativa de vida do produto, é sabido que o valor-R da maioria dos materiais de isolamento diminui com o envelhecimento. Poliisocianuratos e polyisocyanurate tem a mais longa expectativa de vida com maior estabilidade no valor-R. Já as mantas se mal instaladas podem escorrer nas cavidades ou danificar com a umidade diminuindo a expectativa de vida e o valor-R. Estes efeitos podem ser evitados com o detalhamento correto em projeto seguido da construção adequada (CARMODY e WEBER, 2007).

Segundo o consumo de energia não renovável, o processo de fabricação da fibra de vidro e mantas de lã mineral necessitam de grandes níveis de energia, embora seja menor que os produtos rígidos (CARMODY e WEBER, 2007).

No Brasil o mais comum é encontrar isolamento feito com mantas e feltros. Não é usual a utilização de isolamentos soltos em forma de flocos soprados, já a utilização das placas rígidas que são apresentadas como EPS (poliestireno expandido), XPS (poliestireno extrudido), PUR (espumas rígidas de poliuretano) e PIR (espumas rígidas de polisocianurato) é modesta, pois possuem alto custo de aquisição e pouca mão de obra especializada para aplicação.

A lã de vidro e a lã de rocha foram ensaiadas nessa dissertação levando em consideração as exposições feitas por Carmody e Weber (2007) para a escolha dos produtos industrializados. Já a chapa de gesso acartonado (moído e em pedaços) foi escolhida por conta da sua reciclabilidade e facilidade de captação na construção. O resíduo cerâmico (fibras e flocos) foi testado por possuir grande eficiência térmica e ser um resíduo industrial com dificuldade de despejo no meio ambiente.

Segue a revisão bibliográfica sobre os produtos utilizados nos painéis.

A Diretriz SINAT N°003 recomenda que os isolantes térmicos possuam condutividade térmica menor que $0,06\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ (condutividade térmica máxima de um material considerado isolante) e resistência térmica $\geq 0,5\text{ m}^2\text{K/W}$. E aponta como absorventes acústicos os materiais, de baixa densidade, que se destacam por absorver o som. Em geral, são materiais porosos (lã de vidro, lã de rocha, poliuretano, fibras de madeira, vermiculita, fibras cerâmicas, cortiça, tecidos, tapetes, etc.).

2.2.3.1 Lã de rocha

Segundo a Ecocasa (2014), a lã de rocha, deriva de fibras minerais de rochas vulcânicas, entre elas o basalto e o calcário oriundos de depósitos vulcânicos. Era utilizada pelos nativos das ilhas havaianas na cobertura de suas moradias para protegê-los do frio e do calor. É totalmente imune à ação do fogo com excelentes propriedades de isolamento. Depois de aquecer as rochas basálticas e outros minerais a cerca de 1500°C , estes são transformados em filamentos que, aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitem a fabricação de produtos leves e flexíveis ou até muito rígidos, dependendo do grau de compactação (ECOCASA, 2014).

Os feltros termo isolantes à base de lã de rocha são normatizados pela NBR 11722 (ABNT,2014) e os painéis termo isolantes à base de lã de rocha seguem as

prescrições da NBR-11364 (ABNT, 2014). A lã de rocha foi classificada no Grupo 3 (material não cancerígeno), segundo relatório da IARC (*International Agency for Research on Cancer*) que pertence à Organização Mundial da Saúde da ONU.

São comercializadas na forma de feltros em rolos, placas, flocos e mantas. Os mais usuais são os rolos e placas que possuem diversas espessuras (de 25 mm a 100 mm) sendo que as mais comercializadas no Brasil são as de 50 mm e 100 mm. Possuem largura variando de 40 cm a 120 cm. Os rolos possuem geralmente de 6m a 8 m e as placas são oferecidas com 40 cm, 60 cm e 120 cm. A eficiência do revestimento depende da densidade da lã que varia de 32 Kg/m³ até 160 Kg/m³.

2.2.3.2 Lã de vidro

De acordo com a Ecocasa (2014), a origem da lã de vidro provém de uma substância líquida inorgânica obtida através de um composto básico de vários elementos: a sílica, em forma de areia, que assume o papel de vitrificante, o carbonato de sódio, sulfato de sódio e potássio, para que a temperatura de fusão seja mais baixa, e o carbonato de cálcio e magnésio, como estabilizantes para conferirem a este material uma elevada resistência à humidade. O composto é elevado a aproximadamente 1500°C para formar uma massa em estado plástico de altíssima viscosidade, que aumenta à medida que arrefece, mantendo-se em estado de sobre fusão sem cristalizar.

É normatizado pela NBR 10412 (ABNT,2013) - isolantes térmicos de lã de vidro feltros de lamelas — especificação; NBR 11362 (ABNT, 2013) feltros termo isolantes à base de lã de vidro, pela NBR 11358 (ABNT, 2013) - painéis termo isolantes à base de lã de vidro e pela NBR 11360 (ABNT,1989) - isolantes térmicos de lã de vidro - flocos – especificação.

São comercializadas em feltros e mantas com espessuras de 12 mm a 100 mm, sendo que as mais utilizadas no Brasil são as de 50 mm, 75 mm e 100 mm com largura variando de 40 cm a 120 cm. Os rolos possuem de 7,5 m a 25 m e as placas são oferecidas com 40 cm, 60 cm e 120 cm. A eficiência do revestimento depende da densidade da lã que varia de 12 Kg/m³ até 35 Kg/m³.

2.2.3.3 Resíduo industrial - oriundo de flocos e mantas produzidas com fibras cerâmicas

A fibra cerâmica é obtida a partir da fusão de alumina e sílica de alta pureza. Pode ser utilizada continuamente em temperaturas de até 1260 °C ou, por um certo

período, em temperaturas superiores. Possuem as seguintes propriedades: estabilidade sob altas temperaturas, baixa condutividade térmica, baixo peso, baixo calor armazenado, resistência ao choque térmico e a corrosão e ótima absorção de som. Possuem resistência ao ataque da maioria dos ácidos e agentes corrosivos com exceção dos ácidos hidro fluorídricos, fosfóricos e os álcalis concentrados.

A Tabela 6 e Tabela 7 apresentam as propriedades físicas e químicas dos flocos de fibra cerâmica e o gráfico (Figura 19) demonstra a condutividade térmica dos flocos cerâmicos em diversas temperaturas.

Tabela 6: Análise química - flocos e fibras cerâmicas picadas. Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2013).

Análise química típica dos flocos e fibras picadas	
Al ₂ O ₃	47 a 53%
SiO ₂	48 a 53%
Fe ₂ O ₃	0,1%
TiO ₂	0,1%
Na ₂ O	0,1 a 1,3%
Traços	0,5%

Tabela 7: Propriedades físicas típicas dos flocos de fibra. Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2013).

Propriedades físicas típicas dos flocos de fibra	
Cor	Branca
Classe de Temperatura*	1260 °C
Ponto de Fusão	1760 °C
Densidade normal de compactação	50 a 200 Kg/m ³
Densidade embalada	96 Kg/m ³
Diâmetro da fibra (médio)	2 a 3 microns
Comprimento da fibra	Até 100 mm
Densidade específica	2,73g/cm ³
Calor específico a 1100 °C	1130 J/kg K

* A Classe de temperatura dos produtos é determinada pelo critério de mudança linear irreversível e não pelo ponto de fusão.

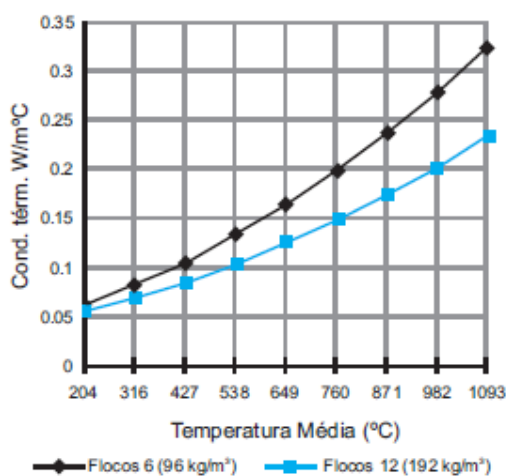


Figura 19: Condutividade Térmica x Temperatura Média (ASTM - C -177). Fonte: Perfil Térmico – laudos IPT (2014).

Valores calculados com base em um fator de emissividade 0,9, temperatura ambiente de 27 °C e zero de velocidade do ar. Os valores de condutividade térmica foram medidos de acordo a ASTM-C-177.

Se molhados, suas propriedades térmicas e físicas são restabelecidas após secagem. São embalados e utilizados como enchimento ou compactados em uma variedade de aplicações: juntas de expansão, selos em base de fornos, enchimento ao redor de blocos de queimadores, selagem em saída de tubos e em fornos de vidro.

São comercializadas sob a forma de mantas, flocos, fibras picadas, papel, placas, peças moldadas a vácuo, cimentos e massas. Os materiais considerados resíduos industriais são os flocos de fibra cerâmica mesclada com o material pulverulento resultado da fabricação dos produtos manufaturados de fibra cerâmica de alta pureza que após o rompimento não voltam ao seu estado original.

2.2.3.4 Resíduo da construção seca - gesso acartonado (drywall moído e em pedaços)

Nas obras de LSF e instalações de drywall, os resíduos das chapas de drywall originam-se principalmente nos recortes ou ajustes dimensionais gerando um volume significativo. De acordo com Miranda (2009), por motivos ambientais e econômicos, existe uma necessidade crescente de reciclagem desses resíduos e o meio científico, empresas e setor público têm realizado ações para o desenvolvimento dessa atividade.

Miranda (2009) comenta que embora os resíduos da construção civil não sejam obrigados ao sistema de logística reversa, ressalta que esses possuem uma regulamentação específica elaborada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA - que explica e determina o que resíduo gerado na construção civil.

Segundo Miranda (2009) em 2002 foi homologada a Resolução CONAMA 307 definindo que grandes geradores públicos e privados são obrigados a desenvolver e a implantar um plano de gestão de RCD (Resíduo da Construção e Demolição), visando a sua reutilização, reciclagem ou outra destinação ambientalmente correta.

O gesso que tinha classificação “C” (Resolução CONAMA 307/2002), ou seja, produto sem tecnologia de reciclagem viável, passa na Resolução CONAMA 431/2011 a ser classificado como “B” passível de reciclagem mantendo-se assim na Resolução CONAMA 448/2012 vigente atualmente no país. (CONAMA, 2012).

Nesse sentido, a gestão do gesso, nas diversas formas em que é aplicado, merece cuidado desde a especificação correta, treinamento da mão de obra, cumprimento das normas técnicas, coleta, segregação, transporte e destinação final. Todo o resíduo de gesso deve ser coletado e armazenado em local específico e seco nos canteiros e separado de outros materiais e do lixo orgânico (DRYWALL, 2012).

De acordo com a Drywall (2012), as áreas de transbordo e triagem (ATTs) estão licenciadas para receber resíduos do gesso. Depois da triagem e homogeneização, o resíduo é vendido para os setores que farão a sua reciclagem. Existem atualmente três frentes de reaproveitamento desse material: a indústria de cimento, a agricultura, e o próprio setor de transformação de gesso.

Esta dissertação testa a reciclagem das chapas de gesso acartonado (drywall) que são desperdiçadas com recortes e quebras como preenchimento. Os pedaços maiores foram colocados no interior do painel evitando as etapas de transporte até as ATTs, triagem e reciclagem do produto e os menores e inutilizados foram moídos.

2.2.4. Acabamento interno e externo

Para essa dissertação é feita uma revisão sobre o estuque sintético (base-coat) que foi aplicado sobre a placa cimentícia e das massas regularizadoras utilizadas para o revestimento do drywall (não sujeito a umidade) na face interna.

De acordo com a NBR 12554 (ABNT, 2010), argamassa é uma mistura uniforme de aglomerantes inorgânicos e agregados minerais contendo ou não aditivos, com capacidade de endurecimento e aderência. As argamassas de revestimento (massas regularizadoras) e tintas para a construção civil devem estar de acordo com as seguintes normas:

- NBR 11702 (ABNT, 2010). Tintas para edificações não industriais;
- NBR12554 (ABNT, 2013). Tintas para edificações não industriais – Terminologia;
- NBR15303 (ABNT, 2005). Tintas para construção civil - Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais - Determinação da absorção de água de massa niveladora; e
- NBR15312 (ABNT, 2005) - Tintas para construção civil - Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais - Determinação da resistência à abrasão de massa niveladora.

2.2.4.1 Estuque sintético (base-coat)

De acordo com Carmody e Weber (2007), o estuque tradicional é uma mistura à base de cimento (uma mistura de cimento Portland, cal, areia, e água) aplicado em três demãos. O estuque sintético, utilizado como acabamento substitui o cimento e cal por

uma base polimérica. É normalmente aplicado em duas demãos, com uma tela de fibra de vidro incorporado na camada intermediária.

A massa regularizadora a base de dispersão (base água) para uso no exterior possui como descrito na NBR 11702 (ABNT, 2013) uma composição genérica a base de dispersão de polímeros como acrílicos, estireno-acrílico ou similares em desempenho, contendo cargas como pigmento. O fabricante deve apresentar informações sobre o teor de resina, aptidão para dissimular fissuras, fissuração e retração e manual de aplicação.

A tela de fibra de vidro aumenta a resistência mecânica da massa evitando possíveis trincas e fissuras. A tela deve possuir proteção contra a alcalinidade do cimento e o fornecedor deve apresentar laudo quanto a esta proteção, gramatura, abertura e resistência à tração. É fornecida em rolos de 1,00 m a 1,80 m largura e geralmente possuem 50 m de comprimento.

2.2.4.2 Massa corrida PVA

A massa PVA a base de resina vinílica é utilizada para nivelar superfícies de alvenaria e concreto. Deve possuir fácil aplicação, possuir textura cremosa e com grande poder de enchimento, secagem rápida e ser fácil de lixar. Deve ser aplicada em camadas finas e sucessivas, com intervalos de 4 horas de maneira a garantir que não ultrapasse 3 mm de espessura, corrigindo as imperfeições da superfície, até obtê-la lisa e nivelada. Uso em ambientes internos (NBR12554, ABNT 2013).

É composta genericamente por resina a base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico, cargas minerais inertes e aditivos. O fornecedor deve apresentar a classificação segundo a NBR 11702 (ABNT, 2010), toxicidade, rendimento, forma de aplicação, número de demãos, tempo de secagem e diluição. É geralmente comercializada em sacos de 20 kg ou baldes.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO

Segundo Crasto, Freitas e Santiago (2012) o objetivo principal do isolamento térmico em um edifício é controlar as perdas de calor no inverno e os ganhos de calor no verão. Nos países que utilizam largamente o LSF, as pesquisas têm propiciado a evolução de sistemas de LSF eficientes quanto ao desempenho térmico devido ao clima e a necessidade de economizar energia.

Santos, Martins e Silva (2014) comentam sobre o surgimento de novas alternativas para o LSF. No entanto, se não forem corretamente ensaiadas e posteriormente especificadas, prejudicam o comportamento térmico e consequentemente a eficiência energética.

2.3.1 Base conceitual

Segundo Frota e Schiffer (2001), as trocas térmicas entre os corpos advêm de uma das duas condições básicas: a existência de corpos que estejam a temperaturas diferentes ou com diferentes estados de agregação e de corpos que estejam a temperaturas diferentes. Os mais “quentes” perdem calor e os mais “frios” ganham. Os elementos da edificação, quando expostos aos raios solares, diretos ou difusos podem ser classificados como: opacos, transparentes ou translúcidos.

Nessa dissertação o objetivo é estudar a troca térmica seca entre paredes opacas e a revisão teve-se a conceitos gerais essencialmente relacionados a essas condições. As trocas térmicas secas acontecem por convecção (troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro um líquido ou gás), por radiação (onde o mecanismo de troca de calor acontece entre dois corpos que guardam entre si uma distância qualquer, ocorrendo mesmo no vácuo) ou por condução (troca de calor entre dois corpos que se tocam ou entre partes do corpo que estejam a temperaturas diferentes).

Frota e Schiffer (2001) comentam que no comportamento térmico da construção, o sol, importante fonte de calor, incide sobre o edifício representando sempre certo ganho de calor que varia com a intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos paramentos do edifício. As trocas de calor de paredes opacas e os mecanismos de trocas podem ser esquematizados como mostra a Figura 20. A intensidade do fluxo térmico (q) que atravessa a parede opaca, sob efeito da radiação solar incidente é dada pela (Eq. 1).

$$q = K (t_e + \alpha I_g / h_e - t_i) \times (W/m^2) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

K — coeficiente global de transmissão térmica ($W/m^2\text{°C}$);

t_e — temperatura do ar externo (°C);

α — coeficiente de absorção da radiação solar;

I_g — intensidade de radiação solar incidente global (W/m^2);

h_e — coeficiente de condutância térmica superficial externa ($W/m^2\text{°C}$);

t_i — temperatura do ar interno (°C)

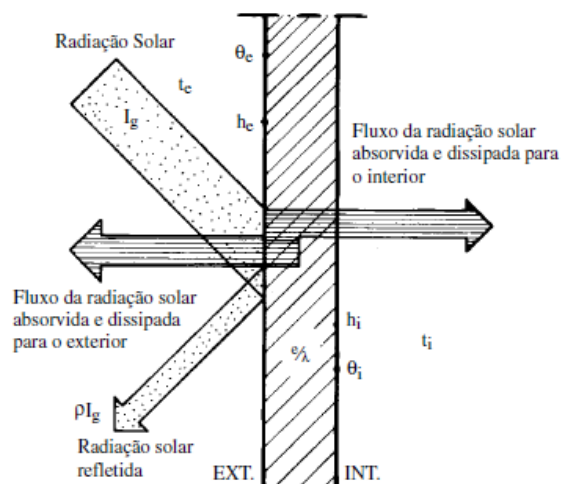


Figura 20: Trocas de calor através de paredes opacas. Fonte: Frota e Schifer (2001).

2.3.2. Massa térmica em vedações externas de LSF

Santos, Martins e Silva (2014) comentam sobre a importância de se proporcionar certa inércia térmica para o edifício, a fim de "absorver" a térmica diária e oscilações originadas por ganho e perda de calor. Segundo Roaf (2006), o desempenho da massa térmica de uma edificação depende de muitos fatores, inclusive da capacidade térmica do material, da localização em relação a outros elementos da edificação e das estratégias de ventilação relacionadas.

De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012) os princípios de isolamento consideram que materiais de grande massa ou densidade são melhores isolantes. Porém, é errado pensar que estruturas e vedações mais leves que têm consequentemente uma menor massa não podem obter condições de conforto satisfatórias.

Crasto, Freitas e Santiago (2012) argumentam ainda que o conceito de lei de massa não pode ser aplicado às construções com LSF. O princípio do isolamento térmico em LSF baseia-se em conceitos mais atuais de isolamento multicamada, que consiste em combinar placas leves de fechamento e o preenchimento do espaço entre chapas com material isolante. Nesse aspecto, diversas combinações podem ser feitas a fim de aumentar o desempenho do sistema, através da colocação de mais camadas de placas e/ou aumentando a espessura do isolamento colocado no miolo.

De acordo com Frota e Schiffer (2001) a inércia térmica está associada a dois fenômenos: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais e depende das características térmicas do envolvente e dos componentes construtivos internos. Comenta ainda que quando, por exemplo, a

temperatura exterior, supostamente igual à temperatura interior, se eleva, certo fluxo de calor penetra na parede. Esse fluxo não atravessa a parede imediatamente, antes a aquece internamente. O atraso e o amortecimento, juntos, compõem a inércia térmica que varia conforme a densidade, condutibilidade e capacidade calorífica da parede.

Além da inércia térmica que acontece na composição multicamada dos painéis de LSF, pode-se considerar a aplicação deste conceito singularmente nos materiais. A National Gypsum empresa sediada na América do Norte produz painéis que incorporam as placas de revestimento conceitos de inércia térmica. As chapas *ThermalCORE Panel* possuem em sua composição o micronal, desenvolvido pela BASF Corporation, que é uma cápsula de acrílico microscópica que contém alta pureza de parafina (Figura 21). As cápsulas absorvem e distribuem a energia de calor com o derretimento e solidificação da cera com fase de mudanças a 23°C. A chapa com ½ polegada e capacidade de calor latente de aproximadamente 22BTU / ft² ou 249920 J/m², absorve e armazena calor durante o dia e libera o calor durante a noite.

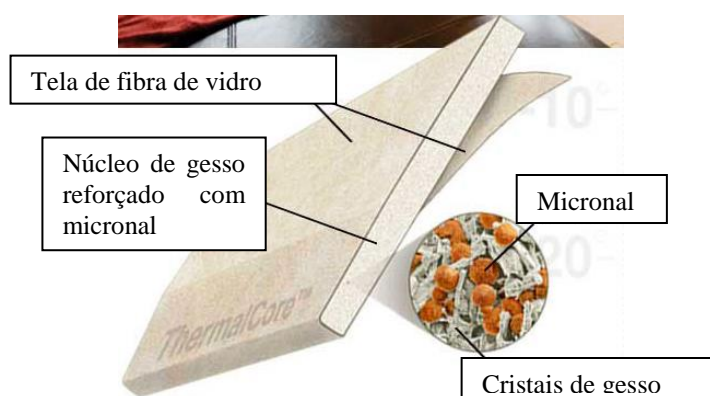


Figura 21: Imagem ilustrativa do *thermal core panel*. Fonte: National Gypsum, 2014.

Melhorar o desempenho de componentes que são obrigatórios na composição dos painéis ao invés de acrescentar mais camadas é uma estratégia sustentável, pois aperfeiçoa a instalação do sistema com economia no tempo, mão de obra e transporte.

2.3.3 Ponte Térmica em vedações de LSF

Segundo Santos, Martins e Silva (2014), ponte térmica é o termo normalmente utilizado para descrever fenômenos localizados onde há um aumento da transferência de calor entre faces. De acordo com Crasto, Freitas e Santiago (2012), o sistema de vedação vertical no LSF tem a capacidade de produzir maiores pontes térmicas, através do contato dos perfis de aço (altamente condutores) com as chapas de revestimento.

Crasto, Freitas e Santiago (2012) complementam ainda que o desempenho térmico das vedações também pode ser influenciado pelo tratamento das juntas dos materiais de fechamento que devem evitar infiltrações de água e vento, de forma a garantir a estanqueidade do sistema, permitindo suas deformações ou movimentações em qualquer condição de temperatura.

Santos, Martins e Silva (2014) apontam ainda que durante a fase de projeto, muitas vezes o efeito das pontes térmicas nos perfis continuam a ser negligenciado ou superficialmente considerado na avaliação do desempenho térmico dos edifícios.

Imagina-se que a área dos perfis é pequena comparada à área da superfície de vedação e que a ponte térmica teria pouca influencia sobre o desempenho térmico, mas deve-se considerar que em determinados pontos, os detalhes construtivos acomodam vários perfis unidos para a resistência estrutural formando grandes áreas metálicas.

De acordo com a SFA (2008) em qualquer tipo de painel de LSF, os fluxos de calor passam diretamente através da cavidade e diretamente através do quadro metálico e comenta que ambos os caminhos devem ser considerados para a abordagem de desempenho. Santos, Martins e Silva (2014) apresentam um estudo que avalia a ponte térmica em três painéis (Figura 22).

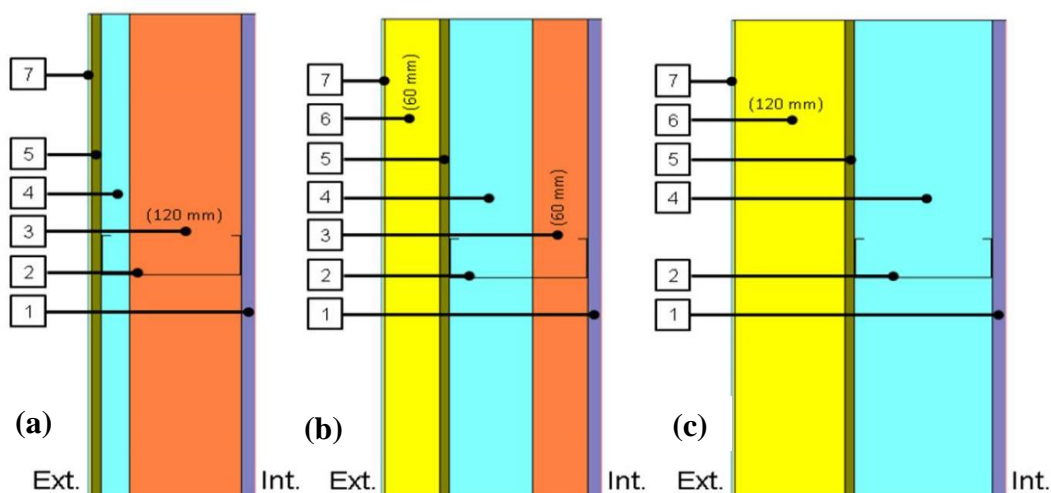


Figura 22: Diferentes composições de LSF. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

Legenda: (1) chapa de gesso acartonado, (2) quadro estrutural, (3) lã de rocha, (4) câmara de ar, (5) OSB, (6) EPS, (7) ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems - estuque sintético.

A Figura 22a ilustra um painel com isolamento térmico de 120 mm no interior da parede, sem isolamento na face externa. Esta configuração não é recomendada para climas frios, considerando que existe um risco mais elevado de condensação do ar no interior das paredes. A Figura 22b mostra um exemplo híbrido onde o isolamento é colocado no interior da parede com 60 mm e na face externa EPS com 60 mm.

Na Figura 22c o isolamento é colocado somente na face externa e possui 120 mm. Esta opção assim como a Figura 22b reduzem o risco de condensação e aumentam a massa térmica da envolvente diminuindo expressivamente a possibilidade de ocorrência da ponte térmica no quadro estrutural metálico como é observado na Figura 23 que apresenta as fotos termográficas dos painéis.

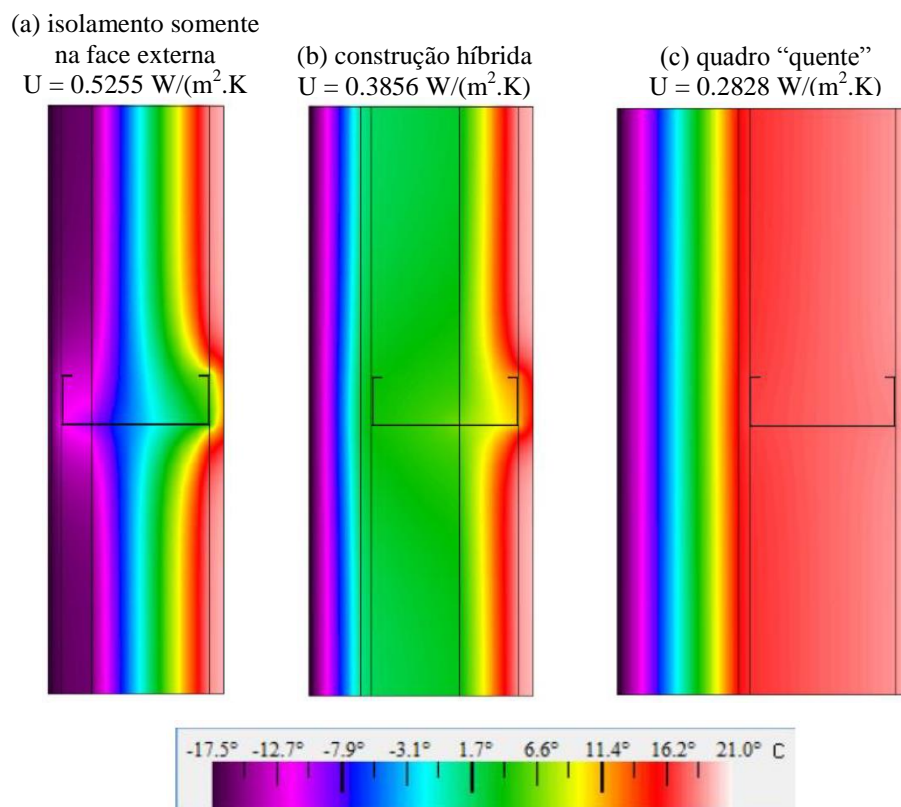


Figura 23: Imagem termográfica dos painéis de LSF. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

Santos, Martins e Silva (2014) apresentam soluções de mitigação da ponte térmica visando à melhoria do desempenho térmico dos painéis:

- Com o aumento do espaçamento de 40 cm de eixo a eixo para 60 cm tem-se um ganho de resistência de 20% com 1,3 cm de EPS e 15 %, com 2,5 cm de EPS.
- A introdução de pausas térmicas permite a criação de uma barreira na transmissão térmica entre os componentes externos e a parte interna do edifício (Figura 24a) e podem ser incorporadas em estruturas permitindo a transmissão de altas cargas. Podem ser utilizados entre steel/steel, steel/concreto e concreto/concreto.
- Aumento do caminho do fluxo de calor através da redução da área do perfil de aço é uma forma eficiente de reduzir o fluxo de calor (Figura 24b).

- A diminuição do contato do perfil com os revestimentos diminui a ponte térmica entre eles. O perfil com geometria diferenciada (Figura 24c) permite a redução da área de contato do montante com os revestimentos em aproximadamente 16%.

- A colocação de fitas ao longo dos perfis ligadas com parafusos ou adesivo (Figura 25) permite a diminuição da ponte térmica nestes locais.

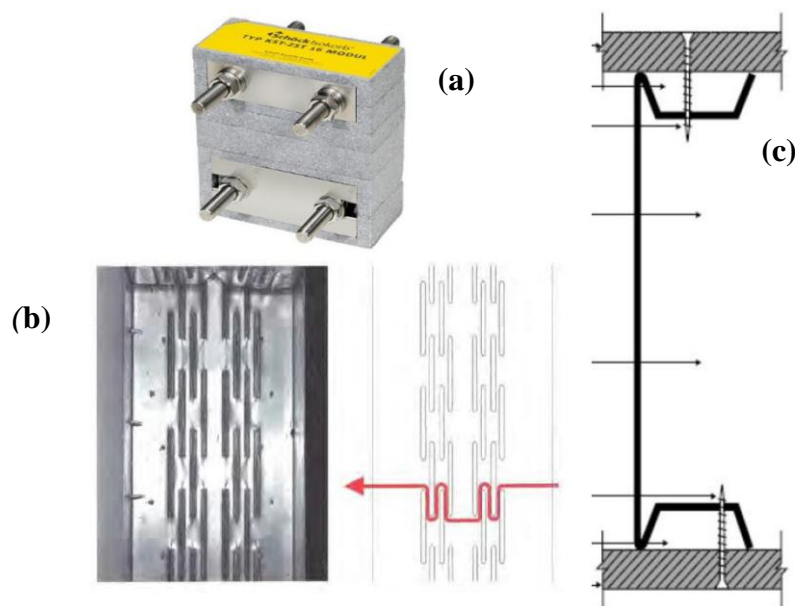


Figura 24: Técnicas de mitigação da ponte térmica: (a) pausas térmicas para componentes de construção. (b) aumento do caminho do fluxo de calor e (c) redução da área de contato do perfil com o revestimento.

Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

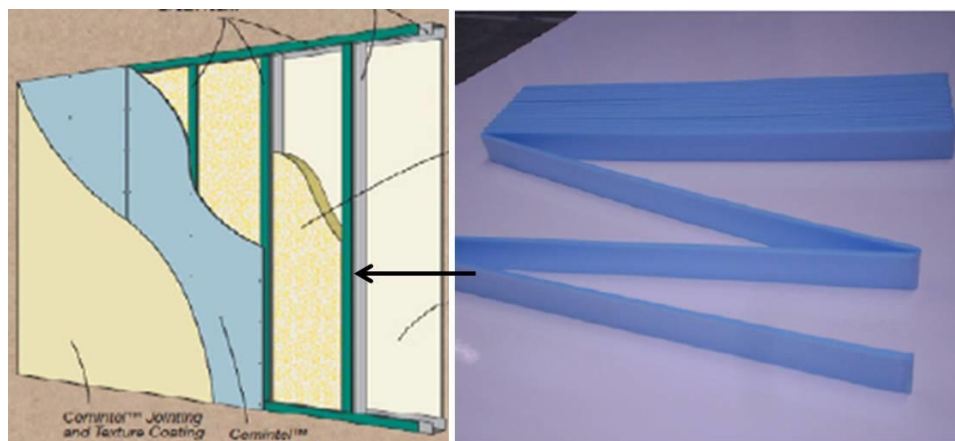


Figura 25: Tiras de ruptura térmica. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

Santos, Martins e Silva (2014) apresentam um estudo de caso sobre uma parede modular de LSF (Figura 26) onde é avaliada a importância de algumas técnicas de mitigação da ponte térmica. A parede com 1,2 m de largura e 2,49 m de altura é constituída por uma estrutura de aço galvanizado formado a frio com diferentes formas

de secção transversal: Perfil C enrijecido – guia ($100 \times 40 \times 10 \times 1$), montante U enrijecido ($75 \times 40 \times 1$) e perfil Z enrijecido ($75 \times 25 \times 1$).

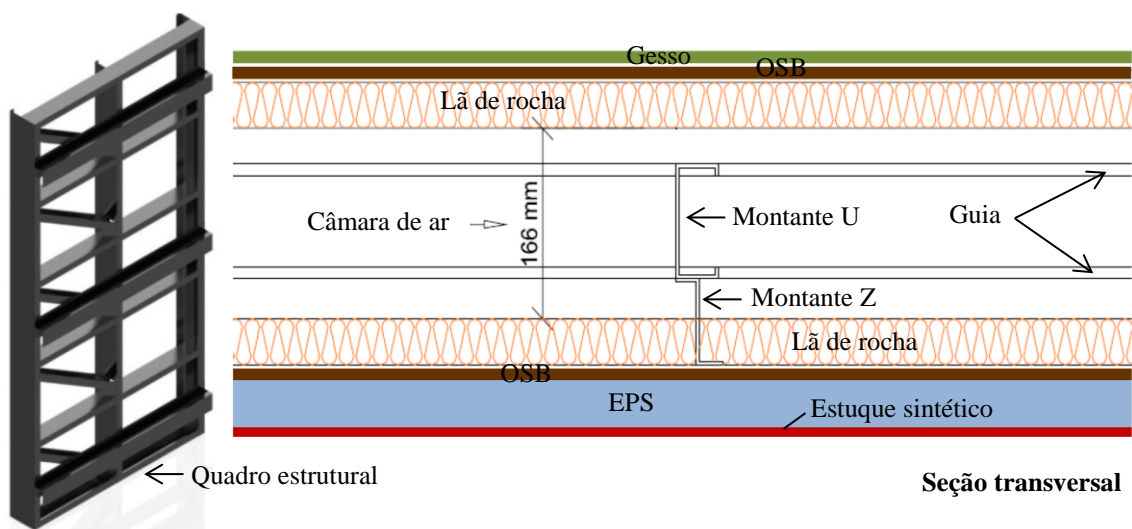


Figura 26: Painel Padrão. Quadro estrutural e seção transversal. Fonte: Santos, Marins e Silva (2014).

Nesse protótipo (Figura 26), três medidas de melhoria de projeto foram implementadas e o aumento do desempenho da parede quantificada. Os resultados numéricos foram obtidos em ambiente computacional. A Tabela 8 apresenta os resultados de resistência (*U-value*) obtidos para cada modelo de parede.

Tabela 8: Resultados do painel apontado na figura 33. Fonte: Santos, Marins e Silva (2014).

Descrição do modelo	U W/(m ² .K)	Diminuição do U (%)
Padrão - parede referência LSF (figura 29)	0.3011	-
A utilização de 10 mm de borracha entre o aço e OSB, na superfície exterior (λ borracha = 0,037 W / (m.K))	0.29554	-1.9
Perfis de aço com remoção de 14% da massa dos quadros	0.2913	-3.2
O uso de parafusos de fixação em vez de das peças horizontais de conexão das placas.	0.2949	-2.1

A primeira estratégia de melhoria foi a inserção de uma tira de ruptura térmica de borracha entre o aço e o painel OSB, na face externa. Este procedimento permitiu uma redução de 1,9% no valor de resistência térmica (U). A segunda abordagem foi a utilização de perfis de aço com ranhuras verticais, com a remoção de 14% da massa dos perfis com redução de 3,2% no (*U-value*). Na última simulação, as pontes térmicas criadas pelas conexões de aço horizontais foram reduzidas através da substituição destes elementos por nove parafusos de fixação reduzindo o U em 2,1%.

Santos, Martins e Silva (2014), comentam que a simulação numérica e imagens termográficas podem ser usadas para avaliar a distribuição da temperatura da superfície e a existência de ponte térmica. Em outro estudo utilizaram a simulação computacional

para avaliar o efeito da ponte térmica antes e depois da aplicação do sistema de revestimento ETICS-External Thermal Insulation Composite Systems que são placas de EPS com acabamento de estuque sintético. Como esperado, o revestimento permite uma significativa redução do fluxo de calor (Figura 27).

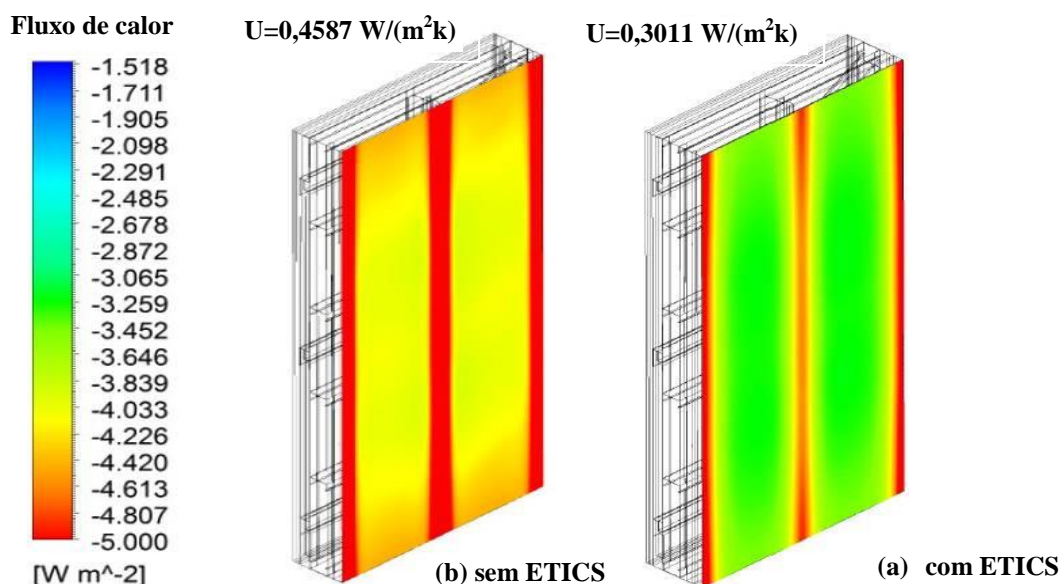


Figura 27: Simulação do fluxo de calor sob o ponto de vista externo. Fonte: Santos, Martins e Silva (2014).

2.3.4 Desempenho térmico segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013)

A seguir, são abordadas as recomendações de desempenho térmico trazidas pela norma e conceitos necessários para o melhor entendimento de tais requisitos.

O desempenho térmico está sujeito a distintas particularidades: características do local da obra (topografia, temperatura, umidade, direção, velocidade do vento, etc.) e da edificação (materiais, dimensões dos cômodos, pé direito, orientação das fachadas, etc.) que estão diretamente relacionadas ao conforto térmico (CBIC, 2013).

A sensação de conforto térmico depende das condições de ventilação dos ambientes e de muitas outras condições. O nível de satisfação ou insatisfação depende, ademais, do tipo de atividades no interior do imóvel, quantidade de mobília, tipo de vestimentas, número de ocupantes, idade, sexo, condições fisiológicas e psicológicas dos usuários. Dessa forma, quando se trata de conforto térmico e desempenho térmico, está se referindo sempre a uma condição média, que atende à maior parte das pessoas expostas a uma determinada condição (CBIC, 2013).

Além dessas condicionantes, o Brasil, pela sua extensão, apresenta uma variedade de climas e, neste sentido, os projetos devem responder de forma adequada às exigências dos mesmos, considerando sempre as características do contexto em que está inserido (CEF, 2010). A NBR 15220 (ABNT, 2005), na sua parte 3, dividiu o país em oito zonas bioclimáticas em função das características de temperatura, umidade e altitude das cidades (Figura 28). Para cada uma dessas zonas climáticas é definido o dia típico de inverno e o dia típico de verão, estabelecidos com base na temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente de acordo com a média observada num número representativo de anos (Figura 28).

O desempenho térmico do edifício no verão considera o valor máximo diário da temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada (salas e dormitórios), sem a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, etc.). Este deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior. Já o desempenho térmico do edifício no inverno considera os valores mínimos diários sempre maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3°C.

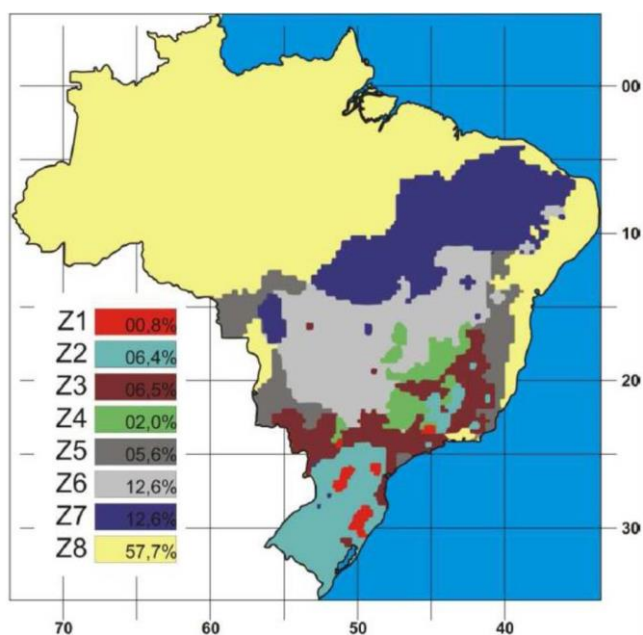


Figura 28: Zoneamento bioclimático brasileiro. Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

A Carta Bioclimática Brasileira estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro (Figura 28) com recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo, com base em parâmetros e condições do contorno (NBR 15220, 2005).

As recomendações de desempenho térmico que constam na NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelecem valores máximos e mínimos de temperatura que podem ser observados no interior da edificação para as oito regiões climáticas brasileiras.

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), é necessário atender pelo menos o nível mínimo (M) de desempenho estabelecido, mesmo sendo informados os índices intermediário (I) e satisfatório (S) e recomenda que se disponibilize a informação do desempenho obtido. A norma propõe diferentes formas de avaliação térmica:

A) Procedimento 1 A – Simplificado (normativo): presta-se a verificar o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes de fachada e das coberturas. Os cálculos para obtenção da transmitância e capacidade térmica estão dispostos na NBR 15220 (ABNT, 2005).

B) Procedimento 1 B – Simulação por software Energy Plus7 (normativo): para os casos em que os valores obtidos para a transmitância térmica e/ou capacidade térmica se mostrarem insatisfatórios frente aos critérios e métodos estabelecidos nas partes 4 e 5 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

C) Procedimento 2 – Medição in loco (informativo, Anexo A da NBR 15575-1): prevê a verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos na NBR 15575 (ABNT, 2013) por meio da realização de medições em edificações existentes ou protótipos construídos com essa finalidade. Tem caráter meramente informativo e não se sobrepõe aos procedimentos descritos nos itens a) e b) anteriores.

No Procedimento 1A que será aplicado nessa dissertação, os valores máximos para a transmitância térmica (U) e os valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica (CT) das paredes são expostos na Tabela 11 e 12 – parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013) e apresentados nessa dissertação na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9: Valores máximos para a transmitância térmica. Fonte: Tabela 11 da NBR 15575 - Parte 4

Transmitância térmica (U) W/m².K		
Zonas 1e 2	Zonas 3,4,5,6,7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	$U \leq 2,5$	$U \leq 2,5$
$\alpha^a = \alpha$ é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede		

A absorvância é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.

Tabela 10: Valores mínimos para a capacidade térmica. Fonte: Tabela 12 da NBR 15575 - Parte 4

Capacidade térmica (C) W/m².K	
Zonas 8	Zonas 1,2,3,4,5,6 e 7
Sem requisito	≥ 130

2.3.5 Cálculo da transmitância e capacidade térmica - NBR 15220 (ABNT, 2005)

Existem diferentes formas de medir o desempenho térmico das edificações e os métodos de cálculo para a obtenção dos valores de transmitância térmica são apresentados em normas aplicadas em diferentes países. No Brasil é utilizada a NBR 15220 (ABNT, 2005) e na Europa é utilizada a ISO 10077-2 (ISO, 2003).

A norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) tem como objetivo estabelecer as definições e os correspondentes símbolos e unidades de termos relacionados com o desempenho térmico de edificações. Sob o título geral “Desempenho térmico de edificações”, contem as seguintes partes:

- parte 1: definições, símbolos e unidades;
- parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- parte 4: medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida; e
- parte 5: medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Nessa dissertação é calculada a transmitância térmica e capacidade térmica dos painéis ensaiados. O cálculo apresentado na parte 2 da norma depende dos índices dos materiais (condutividade térmica, densidade dos materiais, espessura e calor específico) que serão obtidos através de pesquisa dos componentes, lembrando que nem todos os materiais ensaiados nesta dissertação possuem índices conhecidos.

A Tabela 11 apresenta um resumo para os cálculos da transmitância e capacidade térmica das seções nas vedações verticais apresentadas na parte 2 da norma. Entende-se por seção uma parte de um componente tomada em toda a sua espessura (de uma face à outra) e que contenha apenas resistências térmicas em série. Podem ser compostas por única ou mais camadas e devem expressar a totalidade do painel.

Tabela 11: Índices, fórmulas e variáveis. Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005).

Índices	Fórmulas	Variáveis	Conceito
Resistência dos elementos e componentes unidade: m ² K/W	$R = e/\lambda$	e = espessura λ = condutividade	quociente da diferença de temp. verificada entre as superfícies de um comp. pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.
Resistência térmica de componentes com camadas homogêneas e não homogêneas unidade: m ² K/W	$R_t = \frac{\frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{A_a} + \frac{A_b}{A_b} + \dots + \frac{A_n}{A_n}}{\frac{R_a}{R_a} + \frac{R_b}{R_b} + \dots + \frac{R_n}{R_n}}$	* R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, ..., n); * A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção.	é o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente.
Resistência térmica total unidade: m ² K/W	$R_T = R_{se} + R_t + R_{si}$	R_{er} e R_{si} Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa; interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção. Obtidos na tabela B1.	somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.
Transmitância térmica unidade: W/(m ² K)	$U = 1/R_T$	R_T – resistência total	é o inverso da resistência térmica total.
Capacidade térmica das camadas unidade: J/m ² K	$C_t = \sum e_n \cdot c_n \cdot \rho_n$	e_n é a espessura da camada c_n é o calor específico do material da camada ρ_n é a densidade de massa aparente do material da camada	quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área.
Capacidade térmica dos componentes com câmaras homogêneas e não homogêneas	$C_T = \frac{\frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}}{\frac{C_{Ta}}{C_{Ta}} + \frac{C_{Tb}}{C_{Tb}} + \dots + \frac{C_{Tn}}{C_{Tn}}}$	$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$ são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção.	capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor.

2.4 DESEMPENHO ACÚSTICO

O conceito de desempenho de edificações teve origem na Europa, ainda nos anos 1960, tornando-se uma metodologia estruturada para projetar, desenvolver materiais, componentes e sistemas. Em 1984, a norma ISO 6241 – *Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered*, estabeleceu um conjunto de requisitos para a construção de edificações visando a segurança, habitabilidade e sustentabilidade (PIERRARD e AKKERMAN, 2013).

Pierrard e Akkerman (2013) comentam que neste contexto, o desempenho acústico das edificações acabou se tornando exigência de leis e códigos de obras em vários países, enquanto que no Brasil a situação econômica da época era totalmente desfavorável, com escassez de recursos para financiar a produção de edificações. A racionalização e redução de investimento no setor foram traduzidas em redução de espessuras de paredes, pisos, ausência de algumas soluções construtivas o que resultou numa perda do desempenho acústico que, ainda que intuitivamente, os sistemas tradicionalmente usados até os anos 1980 tinham.

A NBR 10152 (ABNT, 1987), estabelece os níveis de ruído máximos admissíveis nos ambientes segundo o tipo de uso, mas o mercado de construção civil não tinha como padrão construtivo atendê-la. A NBR 15575 (ABNT, 2013) veio definir, a partir desses níveis admissíveis previstos na NBR 10152 (ABNT, 1987), os níveis de desempenho que os sistemas construtivos devem ter para atenuar a transmissão dos ruídos nas edificações habitacionais (PIERRARD, e AKKERMAN, 2013).

Conforme definido na NBR 15575 (ABNT, 2013), cabe aos fabricantes de materiais e executores de sistemas construtivos apresentarem aos projetistas o desempenho de seus produtos, pois os parâmetros obtidos dos ensaios de isolamento acústica são os principais dados de entrada no processo de cálculo e simulação de painéis (PIERRARD e AKKERMAN, 2013).

Vê-se no Brasil que poucos fornecedores e executores de sistemas construtivos inovadores, como é o caso do LSF, apresentam informações sobre o isolamento acústico de seus produtos. Tendo em vista essa carência, a dissertação propõe a comparação do isolamento acústico de diversas composições de painéis, iniciando o processo, com uma revisão bibliográfica dos conceitos acústicos e de como o isolamento acústico é tratado em códigos internacionais.

2.4.1 Base conceitual

Way e Couchman (2008) comentam que a maneira como os seres humanos percebem o som, governa a maneira como ele é medido e descrito. Duas características importantes do som são o nível ou intensidade e o tom ou frequência. Níveis de som e valores de isolamento acústico (também chamado de atenuação) são expressos em decibéis (dB), enquanto a frequência é expressa em Hertz (Hz). Quanto maior a

amplitude da onda, maior a intensidade sonora. Quanto maior a frequência, expressa em ciclos por segundo (Hertz – Hz), mais agudo é o som.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estipula valores em dB e explana sobre conceitos relacionados a sons e ruídos (intensidade, pressão, frequência, potência sonora e suas unidades de medida). Segue abaixo uma revisão bibliográfica baseada em Bistafa (2006) sobre estes conceitos.

O som é uma onda mecânica que se propaga em meio elástico. Um som pode provocar um "evento auditivo". Ruído é qualquer sinal que deteriore ou prejudique a transmissão de uma informação. O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo.

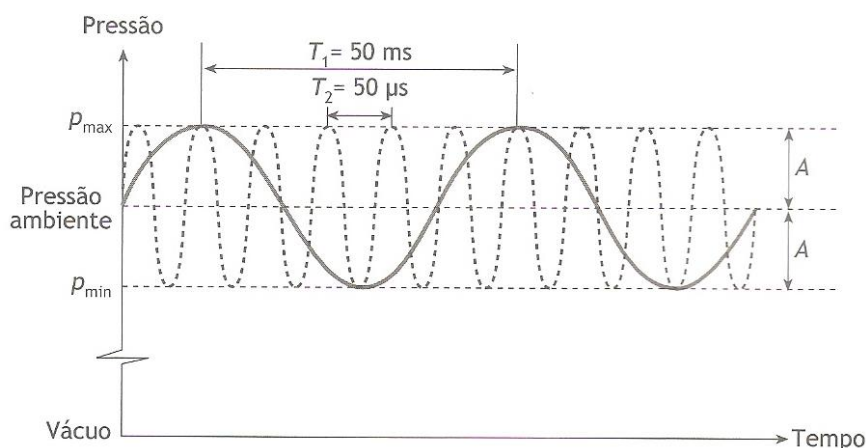


Figura 29: Variação da pressão ambiente em função do tempo para sons com períodos $T_1=50\text{ms}$ e $T_2=50\mu\text{s}$. Fonte: Bistafa (2006).

A Figura 29 mostra a pressão ambiente variando entre um valor máximo (p_{max}) e um valor mínimo (p_{min}), devido à presença de som no ambiente. Pressão sonora é a variação de pressão em torno de um valor médio causada pela passagem de uma onda mecânica. A amplitude (A) da variação de pressão ambiente é dada por $A = p_{\text{max}} - p_{\text{ambiente}} = p_{\text{ambiente}} - p_{\text{min}}$. O tempo decorrido (T) para que um ciclo se complete é 50ms ($T_1=50\text{ms}$) e na linha tracejada, o tempo decorrido para que um ciclo se complete é 50µs ($T_2=50\mu\text{s}$).

Quando a variação da pressão ambiente for cíclica, com período T compreendido entre T_1 e T_2 , e quando a amplitude (A) for maior que o limiar da audibilidade, o sistema auditivo detectará o som. Nessas condições, a variação da pressão ambiente é chamada de pressão sonora (p) ou pressão acústica medida em N/m^2 . Em acústica o usual é trabalhar com o inverso do período, que recebe o nome de

frequência (f) definida como $f=1/T(\text{Hz})$. A unidade de frequência é ciclos por segundo, ou Hertz, em homenagem a Heinrich Rudolf Hertz.

Então frequência indica o número de períodos existentes em um segundo. Para os sons na Figura 29, aquele com o período $T_1=50\text{ms}$, a frequência f_1 é 20Hz e $T_2=50\mu\text{s}$, a frequência f_2 é 20.000Hz (20kHz), limite inferior e superior da faixa de frequência que o sistema auditivo consegue detectar, chamada de faixa de áudio. Os sons representados possuem a mesma amplitude de pressão sonora, no entanto, nosso sistema auditivo percebe a frequência f_1 como grave e f_2 como agudo.

Para uma onda esférica (a propagação que representa a maioria dos sons que ouvimos), ao multiplicarmos a intensidade sonora, a distância r da esfera pulsante, pela área da superfície esférica que envolve a esfera pulsante¹ nessa distância ($4\pi r^2$), obtém-se a potência sonora (W), que está sendo irradiada pela esfera pulsante ((Eq. 2).

$$W = I_r \cdot 4\pi r^2 \text{ (em watts).} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$I_r = W / 4\pi r^2 = p^2_{\text{eficaz}} / \rho c \quad (\text{Eq. 3})$$

A (Eq. 3) revela que, para uma fonte sonora irradiando a potência sonora (W), a intensidade sonora e o quadrado do valor eficaz da pressão sonora são inversamente proporcionais ao quadrado da distância, resultado conhecido como lei do inverso do quadrado da distância. Assim, quando a esfera pulsante (fonte sonora) irradia uma potência sonora constante, ao dobrar-se a distância da fonte sonora, a mesma potência sonora irá atravessar uma superfície esférica que é 4 vezes maior e portanto a intensidade sonora será 4 vezes menor, enquanto que o valor eficaz da pressão sonora, nessa distância será 2 vezes menor.

Uma fonte sonora gera uma certa quantidade de energia sonora na unidade de tempo; isto é, ela gera uma certa potência sonora (W) medida em watts. Essa é a medida básica da quantidade de energia sonora gerada pela fonte sonora, independentemente do meio ambiente. A energia sonora irá gerar certa pressão sonora (p), em determinado ponto da sala. A pressão sonora não dependerá somente da potência sonora da fonte. O valor da pressão sonora também irá depender da distância entre a fonte sonora e o ponto de medição, da parcela de energia sonora irradiada pela fonte que é absorvida pelas paredes e daquela que é transmitida através das paredes, janelas, etc.

Desta forma, o que caracteriza acusticamente uma fonte sonora é sua potência sonora e não a pressão sonora produzida pela fonte em determinado ponto do ambiente.

A potência sonora indica a capacidade de uma fonte sonora em gerar som (característica intrínseca da fonte sonora).¹ Intensidade sonora é uma grandeza utilizada na localização e quantificação de fontes sonoras. A pressão sonora é uma grandeza física fortemente correlacionada com a sensação subjetiva de intensidade do som; ou seja, o quão intenso é determinado o som que escutamos.

O Bel é uma medida do nível de potência em relação à potência de referência, podendo assumir tanto valores positivos como negativos.

$$Bel = \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Na (Eq. 4) p é a potência do sistema e p_0 uma potência arbitraria de referência. Como 0 (zero) Bell corresponde a $p=p_0$ o Bell é uma unidade relativa que depende da escolha de p_0 , o que torna necessário indicar o valor de referência. Assim, 1b equivale a 10db. 1db (ou 0,1b) corresponde a $p=1,26 \times p_0$ enquanto que $p=0,79 \times p_0$ corresponde a -1db (ou -0,1b). Um decibel (1db) é a mínima variação de potência sonora detectável pelo sistema auditivo sendo que este limiar diferencial foi denominado de unidade de sensação.

De acordo com CBIC (2013), as ondas sonoras podem reproduzir-se por diferentes meios e há fenômenos acústicos bastante complexos que interferem no desempenho dos elementos e dos recintos, como difração, ressonância, reverberação e absorção. Tais fenômenos não são tratados na NBR 15575 (ABNT, 2013), recaindo o interesse na propagação dos sons aéreos e dos ruídos de impacto transmitidos por corpos sólidos, como no caso dos entrepisos.

Segundo Silva (2000), o isolamento de ruído pode ser denominado, de acordo com seu meio de propagação. Propagação por meio aéreo, quando a fonte de propagação atua diretamente no ar, por exemplo, vozes e instrumentos musicais e propagação por impacto, quando a fonte geradora atua diretamente sobre a estrutura. Um exemplo é o ruído gerado por passos sobre um piso. Nessa dissertação trataremos exclusivamente dos sons aéreos por estarmos tratando exclusivamente de paredes verticais externas.

Segundo Fasold e Veres (2003), o termo “isolamento acústico” refere-se ao nível de perda de transmissão do conjunto dos elementos construtivos da edificação

¹ Idealização de um tipo paramental de fonte sonora.

(paredes, lajes, janelas e portas), se diferenciando do termo “isolação sonora”, que apresenta o valor da perda de transmissão de um elemento isolado.

De acordo com Bistafa (2006) a isolação sonora é medida através da perda na transmissão (PT) e é proporcionada por materiais densos e reflexivos, impedindo que um ruído se transmita entre dois ambientes contíguos, enquanto a absorção sonora é assegurada através da utilização de materiais fibrosos ou porosos.

Segundo Fasold e Veres (2003), no ruído aéreo, quando as ondas sonoras atingem uma parede, parte da energia é refletida e outra parte é armazenada em seu interior, isso faz com que a parede vibre e se converta em uma fonte de ruído. Este ruído é irradiado com a mesma frequência do som incidente, porém, seu nível de ruído é mais baixo que o nível do som incidente.

Quando o som transmitido via aérea encontra uma superfície, uma parte da energia sonora é refletida de volta e parte é absorvida dentro do elemento e dissipada ou transmitida para o ambiente adjacente conforme ilustra a Figura 30 que também pode ser representada pela (Eq. 5)

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{refletida}} + E_{\text{absorvida}} = E_{\text{refletida}} + E_{\text{dissipada}} + E_{\text{transmitida}} \quad (\text{Eq. 5})$$

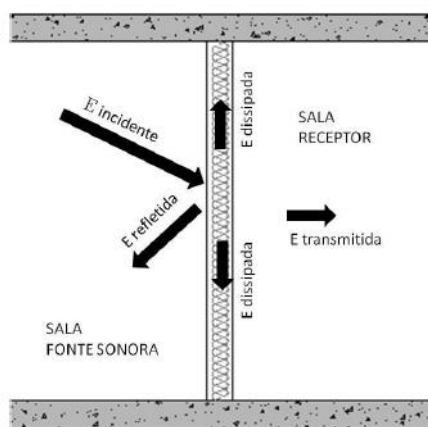


Figura 30: Balanço energético sonoro. Fonte: Bistafa (2006).

A perda de transmissão sonora (PT) ou índice de redução sonora (R) são utilizados na literatura para descrever a redução da energia sonora transmitida de um meio a outro. É a medida de quanta energia sonora é reduzida na transmissão da $E_{\text{incidente}}$ através de elementos construtivos. A redução na transmissão está diretamente relacionada com as propriedades do material colocado na parede e no ar, visto que, toda vez que ocorrer uma mudança das características do meio de propagação da onda

sonora, haverá diferenças na energia sonora transmitida para o meio contíguo (BISTAFA, 2006).

Segundo Bistafa (2006) o parâmetro que caracteriza a capacidade de uma parede de transmitir (ou isolar) o som é o coeficiente de transmissão sonora (τ) (Eq. 6).

$$(\tau) = E_{\text{incidente}}/E_{\text{transmitida}} \quad (\text{Eq. 6})$$

De acordo com Bistafa (2006), quanto menor for o valor de τ , menor será a intensidade sonora transmitida; ou seja; mais isolante será a parede. O parâmetro que normalmente se utiliza pra caracterizar a isolação sonora é uma grandeza dele derivada de (τ) chamada de perda de transmissão sonora (PT) como aparece na (Eq. 7). Observa-se nessa expressão que, quanto menor for τ , mais isolante será a parede, e, portanto maior a sua perda de transmissão.

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau}. \quad (\text{Eq. 7})$$

Ainda de acordo com Bistafa (2006), dada densidade superficial, PT aumenta 6 dB por oitava (6 dB para cada duplicação da frequência). A PT também aumenta 6 dB, em toda a faixa de frequência controlada pela massa, toda vez que a densidade do painel é duplicada. Way e Couchman (2008) também apontam que a transmissão do som em uma parede sólida vai obedecer à lei de massa onde o isolamento acústico de um elemento sólido irá aumentar em cerca de 6 dB por duplicação de massa e que é aplicável entre 10 e 1.000 kg/m².

Way e Couchman (2008) completam que a construção leve atinge melhores padrões de isolamento do som por causa da presença da cavidade interna e por ser composta de diferentes materiais. O isolamento do som de elementos individuais tende a se combinar numa relação linear simples cumulativa. O desempenho global, portanto, em geral, pode ser determinado pela simples adição dos índices dos elementos constitutivos.

Desta forma elementos leves com redução de som de 25 a 30 dB podem ser melhorados acusticamente alcançando uma redução de 50 a 60 dB, ao passo que a lei da massa sugeriria apenas uma melhoria 5 dB. Esta é a base de muitos sistemas leves que é ilustrado na Figura 31. A largura da cavidade entre as camadas separadas é importante para o desempenho acústico de uma parede e deve ser de pelo menos 40 mm (WAY e COUCHMAN, 2008).

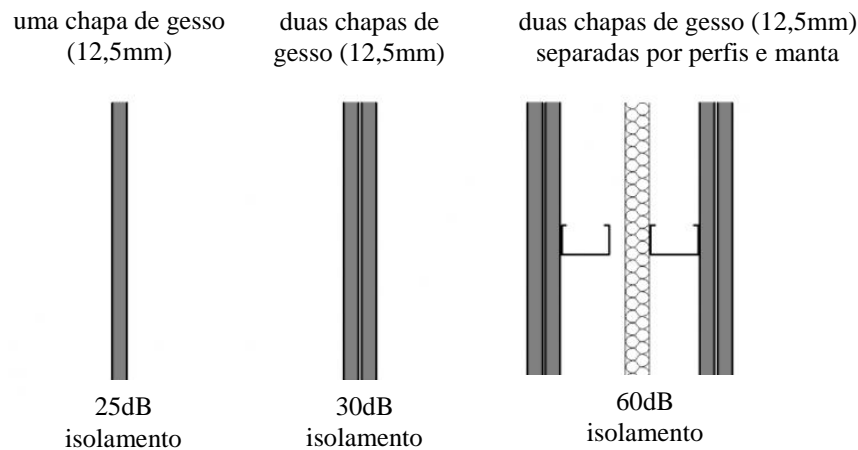


Figura 31: Demonstração do isolamento acústico por camadas. Fonte: Way e Couchman (2008).

2.4.2 Método de função de transferência

A medição de isolamento sonoro *in situ* descrito nas normas ISO 140-5 é sugerido pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Esse método apresenta certas desvantagens sobre o aspecto prático, principalmente em frequências mais baixas (devido à baixa relação sinal-ruído obtida) conforme apontado em Dietrich (2013), sofrendo maior influência de ruídos de fundo, o que causa grande variabilidade no resultados dos testes.

O método consiste em medir níveis de pressão sonora em bandas de oitava em diversos pontos da sala emissora e da sala receptora. Em seguida o tempo de reverberação da sala receptora é medido e pode-se estimar a diferença padronizada de nível entre as salas. O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora no ambiente diminua em 60 dB a partir do interrompimento do sinal de excitação.

Já o método de função de transferência aplicado nessa dissertação utiliza uma abordagem de análise de sinais. Pode-se descrevê-lo como um sistema genérico, conforme é apresentado por Shin e Hammond (2008) e como é mostrado na Figura 32 onde tem-se um único excitador e uma única resposta.

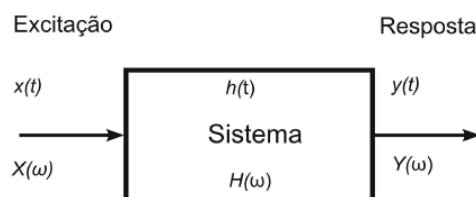


Figura 32: Representação simplificada de um sistema. Fonte: Shin e Hammond (2008).

O método da função de transferência foi utilizado seguindo recomendações obtidas pela literatura e pela norma ISO 18233 que aborda medições utilizando métodos alternativos. Para obtenção da função de transferência será utilizado o sinal de excitação com varredura de senos, método mais recomendado para medições acústicas, conforme aponta Müller e Massarani (2001).

De acordo com Shin e Hammond (2008) a resposta impulsiva $h(t)$ e a respectiva função de transferência descrevem completamente o comportamento de um sistema linear e invariante no tempo. Função de transferência é a própria resposta ao impulso de um sistema, observada no domínio da frequência. Para converter a RI em FT, utiliza-se uma transformada de Fourier.

Todos os principais parâmetros acústicos podem ser obtidos da resposta impulsiva da sala, calculada a partir de um conjunto fonte-receptor (geralmente um alto-falante e um microfone) dentro da sala. Para obter-se a resposta ao impulso de um sistema, pode-se utilizar sinais de excitação. A maneira mais intuitiva é gerar impulsos que possam ser aproximados como um impulso unitário (delta de Dirac), como por exemplo um estouro de um balão (MULLER e MASSARANI, 2001). Dietrich (2013) comenta que essa técnica não é a mais recomendada, devido principalmente à baixa razão sinal/ruído que é obtida.

Há várias técnicas que foram desenvolvidas no decorrer do tempo, como o método TDL, MLS e a varredura de senos, que proporcionam uma melhor faixa dinâmica, reprodutibilidade, menor influência de ruídos externos, entre outras vantagens MÜLLER e MASSARANI (2001).

A transmissão das ondas sonoras entre ambientes ocorre devido à propagação dessas ondas no ar e na estrutura. As possíveis trajetórias das ondas sonoras entre dois ambientes são mostradas na Figura 33 onde é ilustrada a estrutura geral da medição do isolamento obtido pela medição de nível de pressão sonora, com uma fonte sonora, e microfones na sala emissora e receptora (PRESTES, 2015).

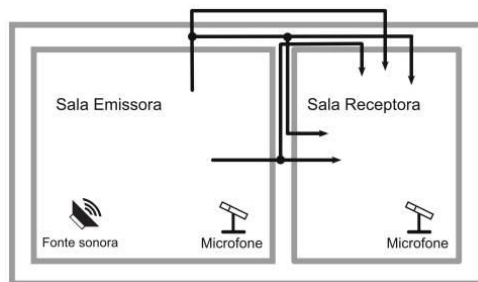


Figura 33: Estrutura geral de medição do isolamento sonoro. Fonte: Prestes (2015).

De acordo com Prestes (2015) o método da função de transferência baseia-se na obtenção da resposta ao impulso em ambas as salas para a cálculo da diferença de nível. Isso é realizado abordando-se o problema como um sistema LIT, condição para a utilização do método. A diferença sonora de nível é calculada pela (Eq. 8), descrita por Venegas (2007) e na norma ISO 18233, onde H_E e H_R correspondem às funções de transferência da sala emissora e receptora.

$$D = L_E - L_R = 10 \log \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|H_E(\omega)|^2} d\omega \right) - 10 \log \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|H_R(\omega)|^2} d\omega \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

Rearranjando os termos obtêm-se a (Eq. 8).

$$D = L_E - L_R = 10 \log \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|H_E(\omega)|^2} d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|H_R(\omega)|^2} d\omega}. \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde as médias espaciais energéticas das funções de transferência são definidas pela (Eq.10).

$$\overline{|H_E(\omega)|^2} = \frac{1}{n_E} \sum_{i=1}^{n_E} |H_E(\omega)_i|^2 \text{ e } \overline{|H_R(\omega)|^2} = \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} |H_R(\omega)_i|^2 \quad (\text{Eq.10})$$

Na n_E e n_R representam o número de medições na salas emissora e receptora. Alternativamente, utilizando o teorema de Parseval, obtemos a (Eq.11) transformada para o domínio do tempo.

$$D = L_E - L_R = 10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} \overline{h_E(t)^2} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \overline{h_R(t)^2} dt} \quad (\text{Eq.11})$$

Onde h_E e h_R são respostas ao impulso as salas descritas no domínio do tempo.

2.4.3 Desempenho acústico segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013)

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estipula critérios para a atenuação acústica dos ruídos de impacto aplicados às lajes de piso e som aéreo para pisos e envelope da construção (fachadas e coberturas) entre outras situações da construção. Considera ruídos externos com intensidade na ordem de 55 dB a 60 dB, típicos de áreas residenciais ou pequenos centros comerciais, estipulados para repercutir em condições

razoáveis de desempenho. Para áreas com a presença de importantes fontes de ruído (rodovias, aeroportos etc.), a norma estabelece que devam ser realizados levantamentos no local e estudos específicos de tratamento acústico.

Para avaliação acústica dos sistemas construtivos, os critérios de desempenho devem ser verificados com a realização de ensaios de campo. Para balizar o desenvolvimento de projetos, a norma prevê a realização de ensaios de laboratório em componentes, elementos e sistemas construtivos, indicando valores de referência que poderão se traduzir no atendimento das implantações reais (CBIC, 2013).

São previstos na NBR 15575 (ABNT, 2013) três métodos de verificação sendo que dois deles são para verificação em campo e um para ensaio em laboratório.

- Som aéreo – verificação de campo – método de engenharia. Unidade: dB - $D_{nT,w}$ – diferença padronizada de nível ponderada; e
- Som aéreo - verificação de campo – método simplificado. Unidade: dB - $D_{2m,nT,w}$ - diferença padronizada de nível ponderada a 2m.
- Som aéreo - ensaio de laboratório – método de precisão. Unidade: dB - R_w - índice de redução sonora ponderado (weighted sound reduction index). Determina o isolamento sonoro de componentes e elementos construtivos (paredes, janelas, portas, etc), fornecendo valores de referência de cálculo para o desenvolvimento de projetos com método descrito na EN ISO 10140-2 (2010). É necessário ensaiar cada elemento isoladamente e depois calcular por meio de fórmulas a resposta global (Tabela 12).

Tabela 12: Índice de redução sonora ponderado, R_w , de fachadas. Fonte Tabela F.11, pág 58 da NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

	Classe de ruído	Localização	Min	Int	Sup
Índice de redução sonora ponderado (R_w)	I	hab. localizada distante de ruído intenso de qualquer natureza	$\geq 25\text{dB}$	$\geq 30\text{B}$	$\geq 35\text{dB}$
	II	hab. localizada em áreas sujeitas a situações de ruídos não enquadráveis nas classes I e III	$\geq 30\text{dB}$	$\geq 35\text{dB}$	$\geq 40\text{dB}$
	III	hab. sujeita ao ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas que estejam de acordo com a legislação	$\geq 35\text{dB}$	$\geq 40\text{dB}$	$\geq 45\text{dB}$

Nota. Valore em dB aproximados / ordem de grandeza para potencial atendimento em de campo.

Os valores de tabela para os ensaios de campo são inferiores aos obtidos em laboratório. As normas ISO 15712 e EN 12354 apresentam procedimentos para se estimar a isolação acústica a partir dos resultados obtidos em laboratório (CBIC, 2013).

Apenas para ilustração e análise dos índices de redução expostos, é apresentada uma tabela estimativa simplificada do grau de inteligibilidade (capacidade de entendimento) do que se está falando em um ambiente adjacente em função do grau de isolamento acústico entre eles, mesmo com certo nível de ruído neste segundo ambiente (Tabela 13) e a correspondência aproximada do ruído segundo os níveis de desempenho em decibéis (Tabela 14) NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela 13: Influência da isolamento acústica $D_{nT,w}$, sobre a inteligibilidade da fala para ruído no ambiente interno em torno de 35dB e 40dB. NBR 15575 (ABNT, 2013).

Inteligibilidade/capacidade de entendimento do que se está falando em voz alta no recinto adjacente	Isolamento sonoro, $D_{nT,w}$ (dB)
Claramente audível: ouve e entende	35
Audível: ouve, entende com dificuldade	40
Audível: não entende	45
Não audível	≥ 50

Tabela 14: Correspondência aproximada do ruído segundo níveis de desempenho. CBIC (2013).

dB	Correspondência aproximada
12	Martelete pneumático, turbina de avião
100	Veículos com escapamento aberto (motos, autos)
80	Avenidas com trânsito intenso, gritos de pessoas
60	Rádio em volume normal, rua com pequeno trânsito de veículos
20	Limite para o repouso tranquilo
0	Limite de audição para jovens, frequência 1.000 a 4.000 Hz

Os requisitos normativos e índices acústicos dos elementos que compõem os edifícios residenciais são normalmente dispostos em regulamentos construtivos orientativos na Inglaterra, País de Gales, Escócia, Irlanda do Norte, Austrália, Japão, etc. que apresentam requisitos e índices dos elementos para: isolamento acústico aéreo para paredes e pisos, impacto de isolamento sonoro para pisos e reverberação do som em partes internas comuns dos edifícios, por exemplo, escadarias e paredes internas. Na Inglaterra e País de Gales, por exemplo, consideram-se paredes de tijolo maciço de 225 mm e paredes de LSF revestidas de tijolos ótimas opções de vedação externa, pois possuem satisfatório desempenho térmico e acústico para a região (WAY, 2012).

Muitas vezes, são os critérios de isolamento térmico que conduzem as escolhas dos revestimentos, uma vez que os requisitos para o isolamento acústico sempre são alcançados em paredes espessas e/ou com muitas camadas (WAY, 2012). No Brasil, que possui um clima predominantemente tropical, deve-se dar igual importância para o desempenho térmico e acústico já que as paredes de LSF possuem menos camadas de revestimento e consequentemente são menos espessas.

2.4.4 Formas de mitigação das fontes de ruídos em paredes externas de LSF

De acordo com Bistafa (2006) todo problema de controle de ruído envolve uma fonte sonora, a trajetória de transmissão e o receptor e comenta ainda que é óbvio que o método mais eficaz consiste em controlar o ruído na fonte, o que é geralmente inviável. Assim o controle do ruído recai normalmente sobre a trajetória de transmissão com soluções como: barreiras acústicas, tratamento de absorção sonora, silenciadores, etc.

Em se tratando da mitigação sonora das superfícies, Way e Couchman (2008) apontam que o som aéreo proveniente do ambiente externo viaja por duas vias: diretamente através parede ou por frestas. O isolamento acústico para ambas as vias é controlado pelas seguintes características: massa, tipologia do material e vedação das envoltórias com a eliminação as frestas. A transmissão por frestas é mais difícil de prever porque é influenciada pelos detalhes das junções entre os elementos de construção e a qualidade de execução da construção.

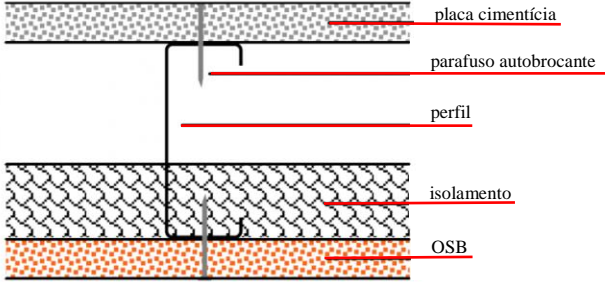
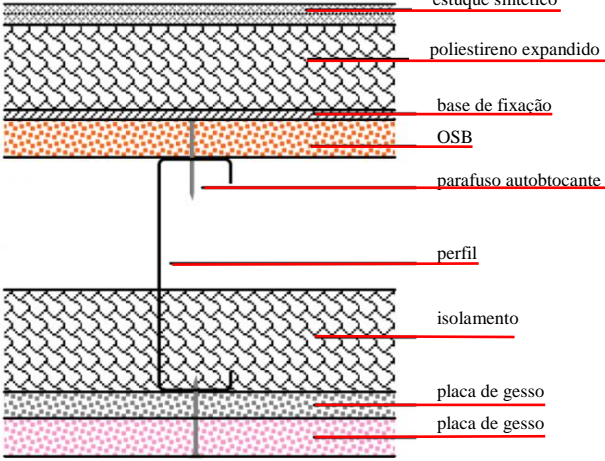
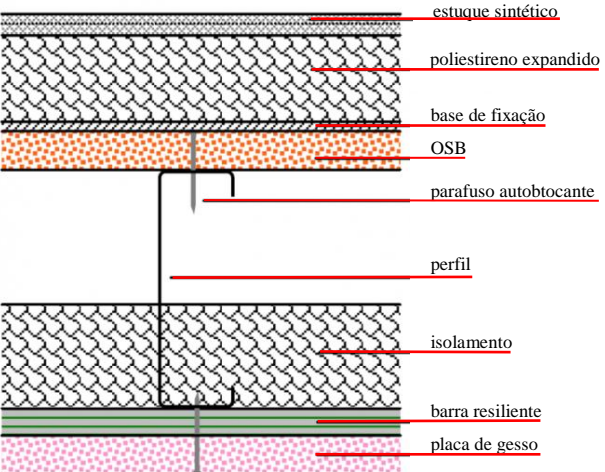
Way e Couchman (2008) apontam a importância do uso do isolamento adequado ao redor de pisos, divisórias e elementos construtivos porque um pequeno espaço pode levar a uma grande diminuição do desempenho acústico. As juntas entre paredes e entre paredes e tetos devem ser seladas com fita ou calafetadas com selante.

É comum painéis apresentarem diversos elementos que interrompam a sua homogeneidade. A perda na transmissão de uma parede composta pode ser obtida a partir da perda na transmissão de seus componentes individuais. Na prática, elementos que destruam a homogeneidade dos painéis devem ser escolhidos de tal forma a apresentarem a mais elevada perda na transmissão e menor área possíveis.

De acordo com Bistafa (2006), quando se deseja uma elevada perda na transmissão com menor peso e custo, são recomendadas paredes duplas. Melhores resultados são obtidos quando os painéis são mecânica e acusticamente isolados um do outro. A perda na transmissão média aumenta com o espaçamento entre os painéis e com a presença de material absorvente na cavidade.

Segundo Way e Couchman (2008), os índices acústicos das composições mais usuais no Reino Unido são descritas em regulamentos construtivos e servem de base para a especificação do conjunto como um todo. Os valores indicativos de desempenho acústico para as diversas composições de painéis foram tabelados, assim como as formas de mitigação das fontes de ruído. São apresentados a partir de medições laboratoriais efetuados de acordo com a norma BS EN ISO 10140 (2010) *Acoustics* -

Laboratory measurement of sound insulation of building elements e disponibilizados para toda a cadeia da construção civil. A Tabela 15 exhibe informações sobre algumas composições de painéis de LSF.

Tabela 15: Desempenho acústico de paredes externas. Fonte: Way e Couchman (2008).	
Descrição	R_w índice de redução sonora ponderado
Parede sólida (225 milímetros alvenaria e reboco)	55dB
Bloco sólido de baixo peso (100 mm bloco e gesso)	43 dB
	parede de aço leve básico (0,95 mm) 45dB
	Parede de steel com revestimento externo de (OSB + poliestireno expandido + acabamento de estuque sintético) 49dB
	Parede de steel com revestimento externo de (OSB + poliestireno expandido + acabamento com adição de <i>resilient bars</i>). 53dB

Way e Couchman (2008) apresentam formas de mitigação das fontes de ruído e nessa revisão bibliográfica foram descritas apenas as que competem às vedações externas, uma vez que, são apresentadas soluções para paredes internas, paredes entre unidades, paredes geminadas, pisos, coberturas, forros, etc.

Perfis acústicos (seção modificada)

Os perfis acústicos foram desenvolvidos para substituir os perfis convencionais. Sua seção diferenciada absorve a energia e reduz a transferência do som (Figura 34). (WAY E COUCHMAN, 2008).



Figura 34: Seções transversais típicas de perfis acústicos. Fonte: Way e Couchman (2008).

Barras resilientes (*resilient bars*)

As barras resilientes são elementos introduzidos em paredes de qualquer natureza utilizados para aumentar o isolamento de som através da absorção de vibrações. São fixadas entre os perfis e os revestimentos e são fabricados em aço leve (0,5 mm de espessura) com seções de 16 mm de profundidade (Figura 35).

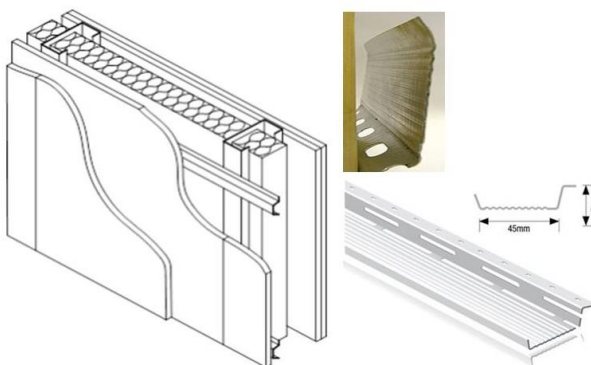


Figura 35: Imagem e detalhe da barra resiliente (*resilient bar*). Fonte: Way e Couchman (2008).

Além dessas alternativas, existem componentes como membranas, bandas espaçadoras e chapas com propriedades acústicas que são aplicadas como camadas adicionais que melhoram o desempenho acústico das paredes de LSF.

Isolamento de elementos construtivos

Segundo Way e Couchman (2008) os detalhes de construção dos pisos, paredes e seus cruzamentos em um edifício são a chave para o seu isolamento acústico. As colunas e pilares de estruturas mistas, por exemplo, servem de ponte de transmissão do

som. As interfaces entre esses elementos e as paredes de vedação devem ser detalhadas e executadas corretamente (Figura 36 e Figura 37).

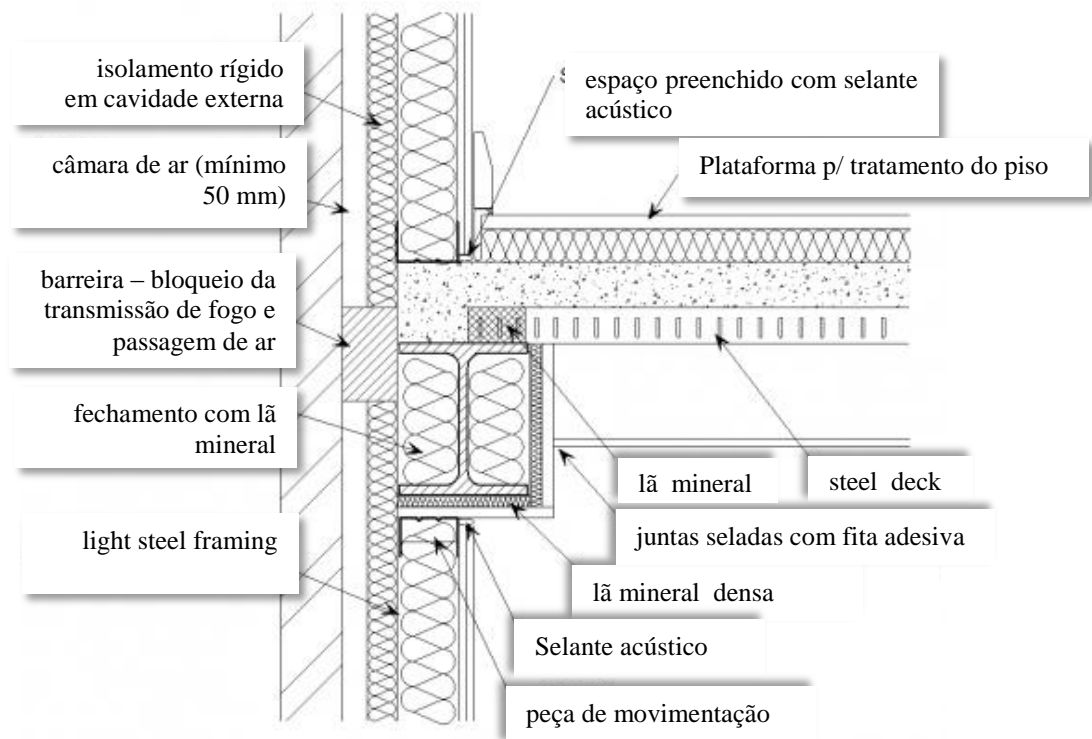


Figura 36: Corte esquemático que apresenta o detalhe de isolamento da viga metálica isolada das com lâ mineral. Fonte: Way e Couchman (2008).

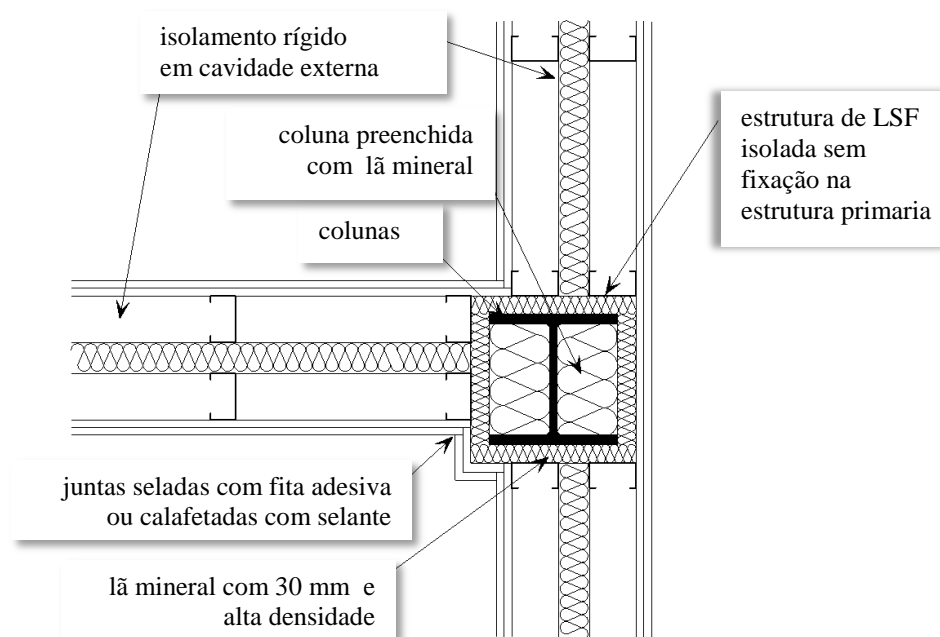


Figura 37: Planta esquemática que apresenta o isolamento dos pilares em relação as paredes de LSF. Fonte: Way e Couchman (2008).

De acordo com Way e Couchman (2008), elementos que encontram com paredes e pisos devem ser embalados com lã mineral e selantes acústicos e onde existem juntas faz-se necessário um detalhamento de vedação adequado (Figura 36 e Figura 37). Revestimentos de parede, como por exemplo, o gesso acartonado, não deve ser penetrado por caixas elétricas ou elementos similares sem que exista uma proteção adequada e deve ser dada especial atenção à forma como estes são executados e isolados.

Integração entre os sistemas

As instalações dos sistemas que penetram nas paredes ou piso e estão localizadas em seu interior devem ser detalhadas de forma adequada para assegurar que o desempenho acústico da construção não seja prejudicado. Deve-se avaliar a localização dos caixas elétricas em todas as paredes, mas principalmente nas paredes de separação de unidades habitacionais, devem ser instaladas de forma escalonada, ou seja, não devem estar na mesma posição em ambos os lados e sempre receber revestimento com absorção acústica (WAY E COUCHMAN, 2008).

De acordo com Way e Couchman (2008), a iluminação embutida pode ser instalada entre pavimentos (fixada no forro) sem perda significativa de desempenho acústico desde que: - exista um vazio mínimo entre a luminária e o teto de 75 mm; - seja instalada uma a cada 2 m² de área de teto; - a distância entre os eixos das luminárias não seja inferior a 0,75 m; - e o diâmetro das aberturas não seja superior a 100 mm.

Paredes em T (encontro entre parede externa e paredes internas)

Para reduzir a transmissão do som por frestas, estas devem ser preenchidas com selante. Deve-se evitar o contato direto entre o revestimento da parede e o piso para reduzir a transferência de vibração. Chapas de gesso, em forros e paredes, devem ser interrompidas antes do encontro com o piso (cerca de 5 mm) e a diferença deve ser preenchida com selante acústico (WAY E COUCHMAN, 2008).

Segundo Way e Couchman (2008), o revestimento deve ser descontínuo no encontro de paredes perpendiculares a parede externa - paredes em T (Figura 38). Sempre que uma parede de separação encontra uma parede interna ou externa, deve ser colocada uma lã mineral adicional e a instalação das placas deve ser feita escalonada, as juntas das diferentes camadas de revestimento não devem coincidir.

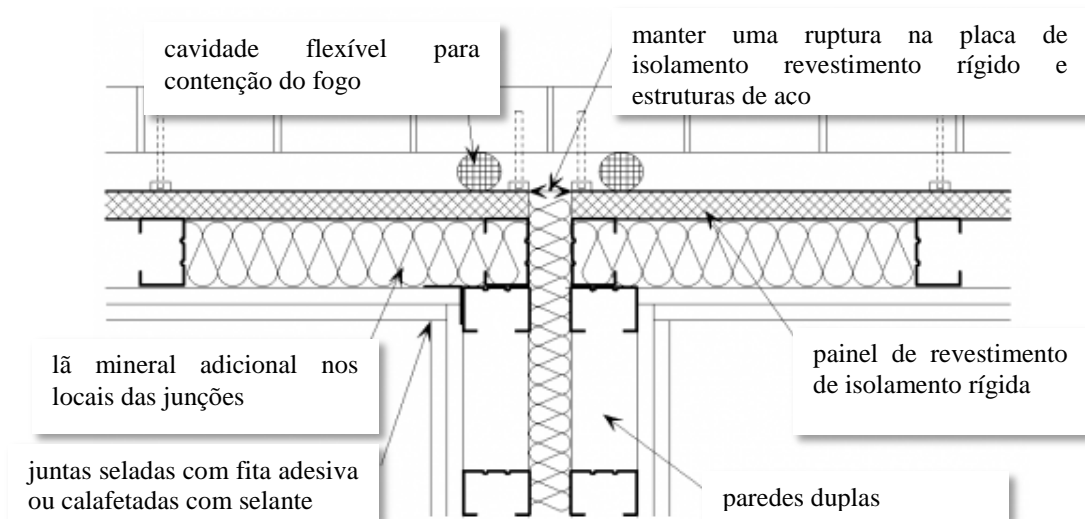


Figura 38: Planta esquemática do encontro de uma parede externa com uma parede divisória de ambientes. Fonte: Way e Couchman (2008).

Encontro de pisos de LSF com paredes externas

No encontro entre piso e parede, os painéis não devem estar em contato direto com o painel laje ou a fundação e a diferença entre ele deve ser preenchida com selante acústico (Figura 39). As juntas entre painéis de parede e as placas de teto devem ser seladas com fita adesiva ou calafetadas com selante; colocar uma camada de lâ mineral adicional (caso ela não faça parte da composição da parede) entre o painel e o chão com no mínimo 300 mm e inserir uma quebra rígida no painel de revestimento que serve também como parada do fogo (WAY E COUCHMAN, 2008).

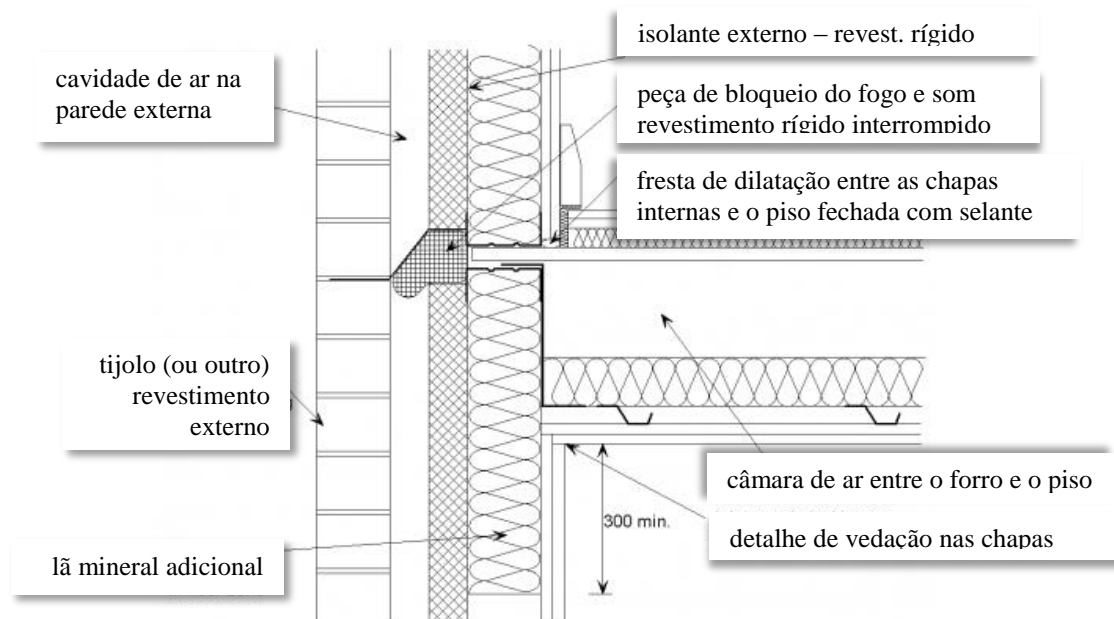


Figura 39: Corte esquemático da junção do piso e parede externa. Fonte: Way e Couchman (2008).

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS

Para a definição das tipologias e materiais utilizados nos painéis, consideraram-se as exposições anteriores sobre a sustentabilidade dos componentes e as tipologias mais utilizadas no território nacional. No Brasil é comum o uso de painéis de vedação vertical de LSF revestidos com placa cimentícia na face externa e gesso acartonado na face interna, com ou sem reforço de OSB. Ambos servem de substrato para os acabamentos (massa com pintura, revestimento cerâmico, pedra, etc.), mas o mais comum é a aplicação do estuque sintético sobre a placa cimentícia na face externa e massa base látex PVA ou acrílica sobre o gesso na face interna. Sempre com material isolante no interior do painel.

O painel é composto por subsistemas e para os ensaios foram divididos em constantes e variáveis. Constantes: quadro estrutural (aço leve), revestimento externo (chapa cimentícia), membrana hidrófuga (proteção contra a umidade) e revestimento interno (chapa de gesso). Variáveis: acabamento externo (estuque sintético), interior do painel, acabamento interno (massas niveladoras) e banda acústica. A combinação dos subsistemas variáveis e constantes formaram 10 tipos de painéis.

3.1.1 Componentes constantes

3.1.1.1 Quadro estrutural em aço leve

Estrutura de aço leve com massa de revestimento de zinco de 275g/cm^2 (Z275) e duas tipologias: montantes posicionados na vertical espaçados entre si a cada 60 cm e guias posicionadas na base e topo dos painéis. A espessura do aço é 0,95 mm, a seção da guia estrutural é 92 mm x 40 mm e a seção do montante estrutural é 90 mm x 42 mm. Foram adquiridos na Multiperfil Grasser Indústria e Comércio de Perfisados Ltda., localizada em São Paulo-SP (Figura 40b).

As ligações entre os perfis foram feitas com parafusos autoatarraxantes com revestimento anticorrosivo resistente a mais de 240h de Salt-Spray (ASTM B117) e 10 ciclos Kesternich (DIN 50018), 3x1/4", cabeça flangeada e ponta broca, distribuídos pelo Grupo Hard Fixadores e Parafusos Ltda, localizada em Joinville-SC.



Figura 40: (a) Vão de alvenaria revestida com cerâmica entre as salas de medição. (b) Instalação do quadro estrutural no vão. Fonte: Autor.

As frestas existentes entre o quadro estrutural e a alvenaria foram eliminadas com a instalação de banda acústica (fita de polietileno expandido com espessura de 3 mm e largura de 90 mm) e aplicação do selante elastomérico monocomponente à base de poliuretano em todo o perímetro (Figura 41).



Figura 41: Aresta do quadro estrutural com banda acústica e selante. Fonte: Autor.

3.1.1.2 Placa cimentícia aplicada na face externa

Foi utilizado placas cimentícias da marca Brasilit com espessura de 12 mm, classe A3, comercializadas em chapas de 1200 mm x 2400 mm e 20,4 kg/m². Massa específica seca de 1,40 g/cm³ e ambiente de 1,70 g/cm³, resistência à flexão saturada de 11 MPa e ambiente de 14 Mpa. Caracterizada como material incombustível segundo a ISO 1182/90 (Figura 42a e 42b).

3.1.1.3 Chapa de gesso acartonado standard aplicada na face interna

Marca Knauf do Brasil, 12,5 mm, dimensão 1200 mm x 1800 mm e peso 8 kg/m². A massa específica para 8 kg/m² é de 640 kg/m³. Possui classificação Classe IIA quanto à propagação superficial de chama. Resistência mínima à ruptura na flexão longitudinal de 550 N, transversal de 210 N e a dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo é de 20 mm (Figura 42c).



Figura 42: Foto (a) – instalação da placa cimentícia. Foto (b) - fixação da placa cimentícia. Foto (c) – placa de gesso acartonado instalado com selante no perímetro. Fonte: Autor.

3.1.1.4 Membrana hidrófuga

É importada pela Tegape Comércio de Tecidos Técnicos Ltda localizada em Curitiba/PR. A membrana hidrófuga possui densidade de 110 g/m³, capacidade respirante de 200 g/m² em 24 horas e é comercializada em rolos de 50 m x 1,30 m. A recomendação do fabricante para sua aplicação é que ela seja parafusada quando aplicada sobre perfis de aço ou clipada quando aplicada sobre a madeira e que nas emendas ocorra transpasse de 15 cm (Figura 43).



Figura 43: Instalação da membrana hidrófuga sobre os perfis. Fonte: Autor.

3.1.2 Componentes variáveis

3.1.2.1 Materiais de isolamento

Os materiais testados no painel foram escolhidos segundo critérios de resistência ao fogo, sustentabilidade e custo. Além das opções industrializadas (lã de vidro e lã de rocha), foram pesquisados materiais com características sustentáveis provenientes de resíduos industriais e da construção civil.

A lã de rocha (Figura 44a) e a lã de vidro (Figura 44b) foram adquiridas em loja especializada em LSF e Drywall na cidade de Curitiba e foram reutilizadas após a conclusão dos ensaios. Foram aplicadas no interior do painel e devem ser amarradas com arame galvanizado na guia superior e nas laterais para evitar seu escoamento dentro do painel.

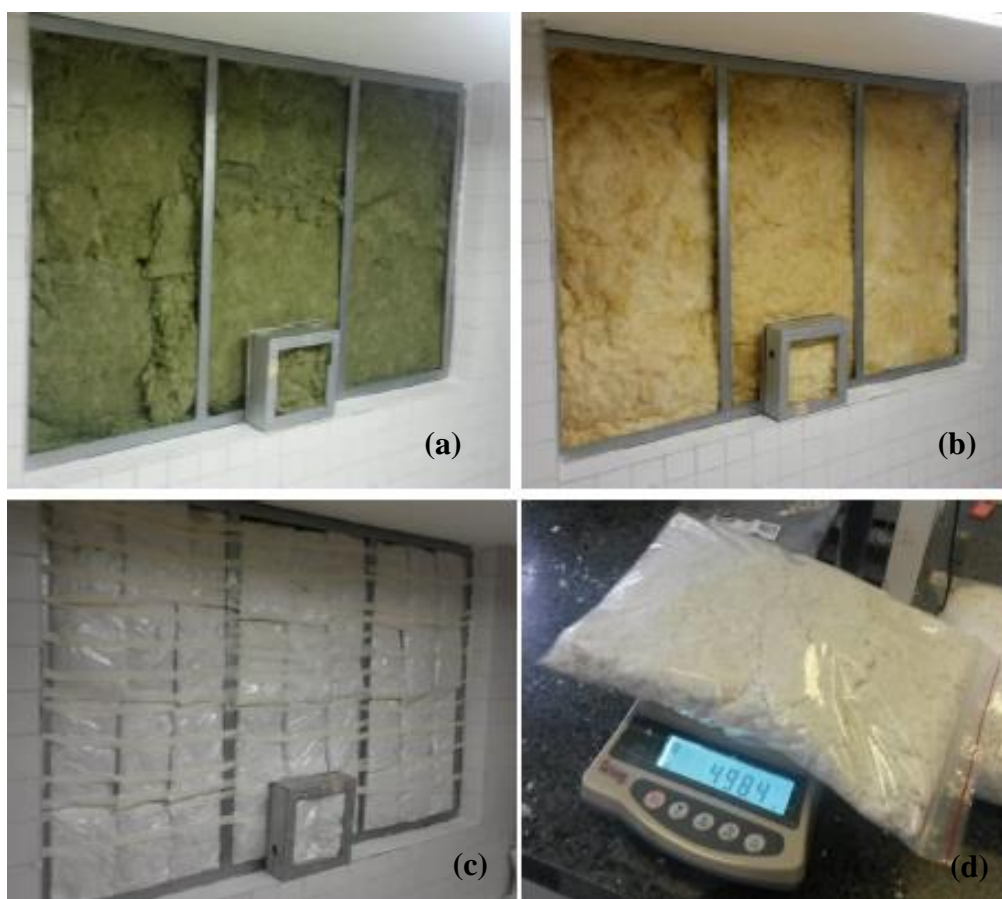


Figura 44: Fotos do miolo do painel sendo preenchido. (a) lã de rocha, (b) lã de vidro, (c) fibra cerâmica. Foto (d) confecção dos sacos de fibra cerâmica com 500g. Fonte: Autor.

Lã de rocha - Fabricada pela La Rocha Indústria e Comércio de Fibras Ltda localizada em São Paulo. Possui 70 mm de espessura, 600 mm de largura e é comercializada em rolos de 6,00 m e 8,00 m (Figura 44a).

Lã de vidro – Comercializada pela Isover Saint Gobain, tipo WF50A. Possui 50 mm de espessura, largura de 600 mm e é comercializada em rolos com 12,50 m e 7,50 m (Figura 44b).

Resíduo industrial de fibras cerâmicas - O resíduo foi disponibilizado pela empresa Perfil Térmico que possui sede industrial em Joinville/SC e sede administrativa em Curitiba. O resíduo apresenta diferentes granulometrias e foi encapsulado em sacos plásticos de 30 cm x 20 cm com 500g de fibra cerâmica em média. Foram utilizados 72 sacos com 500g totalizando 36 kg de material com massa unitária entre 192 kg/m³ e 133,06 kg/m³ (Figura 44c e d).

Gesso acartonado (drywall) em pedaços - Os pedaços de gesso foram coletados em obras e selecionados com pelo menos um dos lados ≥ 10 cm. Foram acomodados no interior da parede de forma a evitarem a existência de frestas com espessura média de 2,5 cm (duas chapas sobrepostas) e fixados entre si com parafusos para impedir a movimentação. Os pedaços foram pesados e totalizaram 21,80kg de gesso (Figura 45a).



Figura 45: Foto (a) - miolo preenchido com os pedaços de placas de gesso acartonado. Foto (b) Gesso moído. Fonte: Autor, 2015.

Gesso acartonado (drywall) moído - Os pedaços de gesso foram coletados em obras sem distinção de tamanho e posteriormente moídos em um moinho de martelos com capacidade de produção de 1 m³/h e grelha interna com espaçamento de 5 mm aproximadamente, que é utilizado para reciclagem de pequenas quantidades de material, ideal para canteiros de obras.

O material gerado após a moagem (gesso com papel kraft) foi colocado dentro do painel já com as placas de fechamento instaladas sem nenhum tipo de

encapsulamento (Figura 45b). Antes desta forma de instalação foram feitos vários testes para o preenchimento do painel, todos sem sucesso. A primeira tentativa foi a colocação do gesso em sacos de aproximadamente 10 kg. O empilhamento forçou os sacos da base do painel impossibilitando a instalação da chapa de gesso para fechamento do painel. Outra tentativa foi a colocação dos sacos de gesso com 10 kg com a chapa de gesso de fechamento instalada. A parte superior da chapa foi cortada e pela abertura os sacos foram colocados. Esta alternativa também foi descartada pela dificuldade de acomodação dos sacos no interior do painel deixando grandes câmaras de ar em seu interior.

3.1.2.2 Acabamento externo – Estuque sintético

O estuque sintético também conhecido como *base-coat* é a composição de dois materiais: massa polimérica hidro-repelente que bloqueia a absorção da água e a tela de fibra de vidro resistente a alcalinidade do cimento que tem como função melhorar a resistência mecânica da argamassa evitando trincas e fissuras.

A massa é comercializada em sacos de 20 kg e fabricada pela indústria Testurite Revestimentos localizada em Pinhais/PR. É utilizada para acabamento de blocos de concreto no sistema de alvenaria de blocos. A tela de fibra de vidro possui malha de 2 mm x 2 mm, 110 g/m² e é comercializada em rolos de 1,00 m x 50,00 m. É importada pela Tegape Tecidos Técnicos Ltda., localizada em Curitiba/PR.

Foi aplicada uma camada fina de massa com espátula e desempenadeira que ainda úmida recebeu a tela de fibra de vidro esticada com sobreposição de 10 cm nas emendas. Após 2 horas foi aplicada mais uma demão totalizando aproximadamente 3 mm de espessura (Figura 46a).

3.1.2.3 Acabamento interno (variável)

Massa látex PVA - Marca Suvinil, classificada pela NBR 11702 (ABNT, 2013) como tipo 4.5.2. - massa niveladora e de enchimento à base de dispersão (base água) para uso interno em ambientes secos e não molháveis. É composta de polímeros vinílicos ou similares em desempenho, contendo cargas e pigmentos. Ainda de acordo com a NBR 15312 (ABNT, 2010), deve resistir às variações de temperaturas brasileiras e ser resistente à lixabilidade (abrasão). Comercializada em latas de 18 litros, com secagem de 40 minutos ao toque e 2 horas final. É aplicada com espátula e

desempenadeira sobre o gesso acartonado após o tratamento das emendas entre chapas com fita e massa. Espessura aproximada de 2 mm.



Figura 46: Foto (a) - aplicação do estuque sintético. Foto (b) - aplicação da massa PVA sobre o gesso. Foto (c) – aplicação das tiras de ruptura térmica sobre os perfis. Fonte: Autor.

Massa com resíduos de fibra e celulose - A massa possui fibras sintéticas e de celulose moídas que são resíduos industriais. Foi desenvolvida pela indústria Testurite Revestimentos localizada em Pinhais/PR e poderá ser comercializada em sacos de 20 kg. Não é tóxica, possui rendimento de aproximadamente 2 kg/ m^2 e deve ser aplicada em uma demão. Tempo de secagem ao toque 1 hora e tempo total de 6 horas (Figura 46b).

3.1.2.4 Tiras para ruptura da ponte térmica

Esta solução consiste na colocação de tiras de isolamento aplicadas sobre o quadro de aço na face externa (Figura 46c). Marca Knauf , espessura de 6 mm, largura de 40 mm e uma das faces adesiva. É comercializada em rolos de 10 m e 30 m. Possui condutividade térmica de $0,041 \text{ W/(m.K)}$. Utilizada como banda acústica para vedação do perímetro de painéis de LSF e drywall e nunca para mitigação da ponte térmica.

3.1.3 Resumo das características físicas dos componentes dos painéis

Tabela 16: Características físicas dos materiais.

Material		Esp. (e)	Massa específica (ρ)	Condutiv. térmica (λ)	Calor específico(C)	Coef. de absorção sonora (RW)
		mm	kg/m ³	W/(m.K)	kJ/(kg.K)	(dB)
Estrutura aço leve Z275g		0,95	7800	55	0,46	--
Membrana hidrófuga		0,13	--	--	--	--
Placa cimentícia		12,5	1600	0,65	0,84	--
Chapa de gesso acartonado		12,5	875	0,35	0,84	--
Manta lã de vidro		50	38	0,045	0,70	43
Manta lã de rocha		70	40	0,045	0,75	43
Fibra cerâmica		90	192	0,187	1,13	--
Pedacos de gesso		25	875	0,65	0,84	--
Gesso moído		90	356,5	--	--	--
Estuque sintético	Massa polimérica	3	2000	1,15	1,00	--
	Tela fibra de vidr	0,1	110	--	--	--
Massa PVA		1,5	1180	0,125	1,28	--
Massa com fibra e celulose		2	--	--	--	--
Tira de ruptura		6	--	0,041	--	--

Fonte: Tabela B.3. NBR 15520 (ABNT, 2005) e fabricantes (fibras cerâmicas – dados fornecidos pela empresa Perfil Térmico, argamassa polimérica – dados fornecidos pela empresa Testurite.

3.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Para facilitar o entendimento dos ensaios, foi criada uma sigla para cada painel que desconsidera os componentes constantes: quadro estrutural, revestimentos e membrana hidrófuga. Ou seja, as letras que formam as siglas indicam os componentes variáveis para cada posição no painel como descrito na Tabela 17.

Tabela 17: Nomenclatura dos painéis ensaiados. Fonte: Autor.

1ª letra Interior do painel	2ª letra Acabamento externo	3ª letra Acabamento interno	4ª letra Ruptura da ponte térmica
V = lã de vidro	E = estuque sintético	L = massa látex PVA	B = banda acústica de polietileno de 6 mm
L = lã de rocha	X = ausência de material	C = massa de fibra de celulose	X = ausência de material
F = fibra cerâmica	-	X = ausência de material	-
P = drywall em pedacos	-	-	-
M = drywall moído	-	-	-
X = ausência de material	-	-	-

A primeira letra refere-se ao tipo de material utilizado no interior do painel, a segunda letra refere-se ao material utilizado no acabamento externo, a terceira letra

refere-se ao material utilizado no acabamento interno e a quarta letra indica a presença ou não de material para ruptura da ponte térmica.

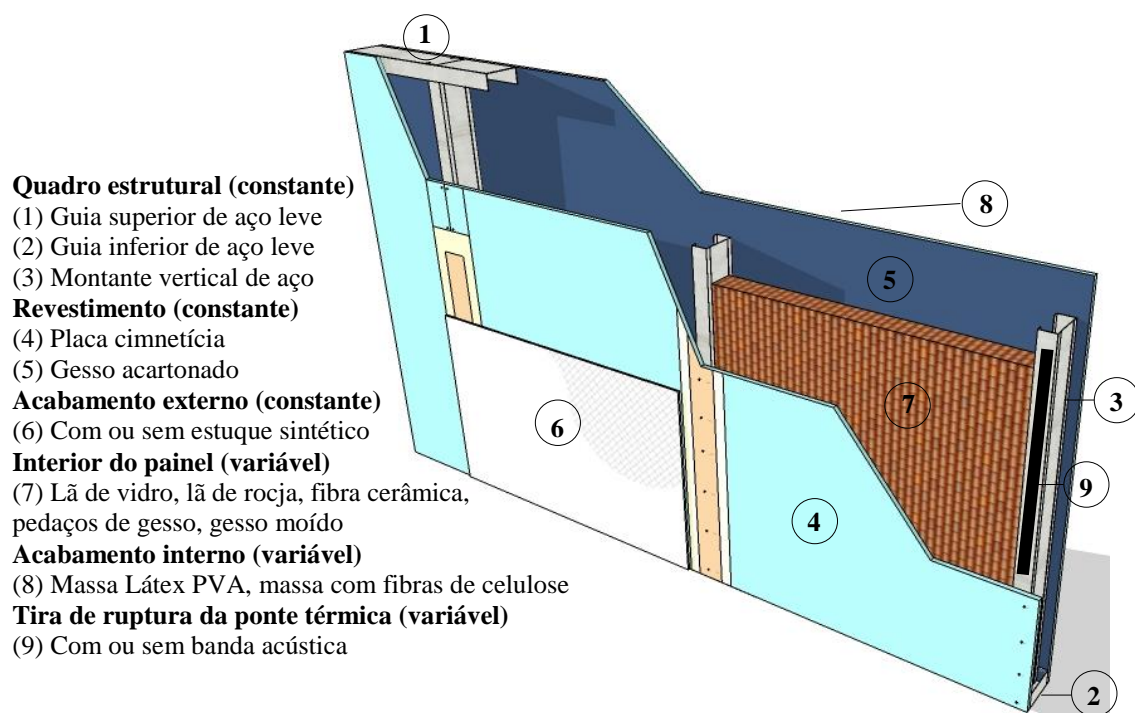


Figura 47: Desenho esquemático do painel base do experimento. Fonte: Autor.

O painel foi executado no vão existente entre a sala de emissão e sala de recepção com a inserção ou troca dos materiais a serem testados.

Na troca do componente localizado no interior do painel, a placa de gesso era retirada e recolocada e foi trocada após cinco ensaios por conta do desgaste da peça. Sempre depois de parafusada nos perfis, o perímetro era fechado com massa de gesso e selante para evitar ao máximo a formação de frestas, lembrando que a banda acústica colocada no perímetro do quadro estrutural garantiu a vedação do painel e não era movimentada nem retirada durante a troca ou instalação dos componentes. Os testes foram executados após a secagem dos selantes e massas.

A posição dos parafusos de fixação das placas (cimentícia e gesso) eram retiradas para a troca do material no interior do painel e recolocados na mesma posição ou muito próximos do local de origem.

A cada nova tipologia os procedimentos e ensaios eram realizados e as informações recolhidas registradas para análise e interpretação.

Na Tabela 18, estão discriminados os painéis ensaiados com definição detalhada da tipologia de cada um.

Tabela 18: Apresenta a tipologia e composição dos painéis segundo nomenclatura criada. Fonte: Autor.

Painel	Material	Local
XXXX (painel base)	X = ausência de material	Interior do painel
	X = estuque sintético acabamento externo	Acabamento externo
	X = ausência de acabamento	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre os perfis
XEXX	X = ausência de material	Interior do painel
	E = estuque sintético acabamento externo	Acabamento externo
	X = ausência de acabamento	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre os perfis
XELX	X = ausência de material	Interior do painel
	E = estuque sintético acabamento externo	Acabamento externo
	L = massa látex PVA	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre os perfis
VELX	V = lã de vidro	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa PVA látex	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre os perfis
RELX	R = lã de rocha	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa látex PVA	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre os perfis
PELX	P = pedaços de drywall	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa PVA látex	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre quadro estrutural
FELX	F = fibra cerâmica	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa PVA látex	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre quadro estrutural
MELX	M = gesso moído	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa PVA látex	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre quadro estrutural
VECX	V = lã de vidro	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	C = massa com fibra de celulose	Acabamento interno
	X = ausência de ruptura da ponte térmica	Sobre quadro estrutural
VELB	V = lã de vidro	Interior do painel
	E = estuque sintético	Acabamento externo
	L = massa PVA látex	Acabamento interno
	B = banda acústica	Sobre quadro estrutural

3.3 LEVANTAMENTO DO CUSTO DOS PAINÉIS

Para a análise do custo dos diferentes tipos de painéis, foi levantado o preço dos materiais utilizados em cinco cidades brasileiras: Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), São Paulo (SP), Belo Horizonte (MG) e Recife (PE) em fevereiro de 2015. O valor da mão de obra foi obtido com três construtoras especializadas em LSF atuantes em Curitiba, Ponta Grossa e Minas Gerais. Os valores apresentados são as médias dos custos obtidos.

Para calcular o valor de instalação do resíduo do gesso acartonado considerou-se que a economia no transporte e descarte do material gerou um saldo positivo. Para tal cálculo, foi feita uma pesquisa sobre o valor do seu descarte e transporte. A Essencis Soluções Ambientais que é uma empresa de tratamento e destinação de resíduos e possui sede em diversos estados brasileiros, informou que o valor para a destinação do resíduo de gesso acartonado é R\$ 340,00 por tonelada. O transporte até o local é feito normalmente em caçambas e as empresas que realizam este tipo de transporte cobram por uma caçamba de 5 m³ R\$ 350,00 em média.

Para calcular o valor do descarte do gesso foram estipulados parâmetros que correspondem à realidade do mercado:

- caçamba de 5 m³ com 70% de resíduo de gesso e 30% de vazios, totalizando 3,5 m³;
- valor de transporte do material (caçamba 5m³) – R\$ 350,00
- valor para a destinação do resíduo – R\$ 340,00/t;
- descarte de chapas de gesso standard (ST). Espessura de 12,5mm e peso de 9,5 kg/m²;
- valor da hora do servente – R\$ 4,73
- 0,0125m³ pesam 9,5 kg, logo a caçamba com 3,5m³ pesa 2,66 t.

A destinação da caçamba com 3,5m³ de resíduo de gesso acartonado custa para o construtor R\$ 1.254,40 (R\$ 350,00 (transporte) + R\$ 904,40 (2,66 t x R\$ 340,00)). Se o descarte de 3,5m³ corresponde a R\$ 1.254,40, logo 0,0125m³ (1m²) corresponde a R\$ 4,48/m².

No caso do gesso colocado no interior da parede em pedaços, este saldo positivo é computado diretamente já que não existe nenhum gasto com a moagem e transporte do material até as áreas de destinação como é o caso do gesso moído que contabiliza o valor da mão de obra de moagem, o uso e o desgaste do moedor e transporte até o local.

Para formular o valor da mão de obra da moagem tem-se que é possível moer $1\text{m}^3/\text{h}$ e a hora do servente é R\$ 4,73 então o valor da mão de obra de moagem de $0,0125\text{m}^3$ (1m^2) é R\$ 0,06.

O moinho de martelo consome aproximadamente 3,67 kW / 5 CV e o valor da energia elétrica é R\$ 0,34574/kWh (ANNEL, 2015). Logo o valor gasto com energia para o funcionamento do equipamento é de R\$1,27 por hora. Para moer 1m^2 de resíduo gasta-se R\$ 0,015/h em energia elétrica.

O cálculo para o descarte do gesso é: R\$ 4,48 (saldo positivo com a economia do descarte do material). Deste valor deve-se subtrair R\$0,06 (valor da mão de obra de moagem) e R\$0,015 (valor gasto com energia no momento do moagem). Tem-se então um saldo positivo com a moagem das chapas de gesso acartonado de R\$ 4,40/ m^2 .

Para a fibra cerâmica considerou-se que o material e seu transporte seriam fornecidos pela indústria fornecedora com custo zero, já que a economia seria em torno de R\$ 480,00/t como informado por uma ATT (Área de Transbordo e Triagem) quando pesquisado sobre o valor do descarte do resíduo.

3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico dos painéis foi analisado de duas formas: - cálculo segundo o procedimento 1A (Simplificado – normativo) sugerido pela Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) nos painéis que possuíam índices e características conhecidas para inserção nos cálculos e o experimento térmico que foi realizado com todas as tipologias de painéis.

3.4.1 Cálculo segundo procedimento 1A (Simplificado – normativo)

Para a avaliação do desempenho térmico das vedações verticais através da Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), foi aplicado o Procedimento 1 (Simplificado - normativo) que verifica o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes de fachada e das coberturas. Este cálculo foi feito apenas para os painéis com propriedades conhecidas. Os cálculos para obtenção da transmitância e capacidade térmica seguiram os procedimentos descritos pela NBR 15220 (ABNT,

2005) - parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.

Para este procedimento, obteve-se as propriedades dos materiais que compõem os painéis ensaiados: espessura (mm), condutividade térmica (W/m.K), calor específico (kJ/kg.K) e massa específica (kg/m^3) que aparecem na Tabela 16 dessa dissertação. Foram obtidos nas tabelas normativas apresentadas na NBR 15520 (ABNT, 2005) e com os fabricantes dos produtos, como é o caso da massa polimérica e da massa PVA que representam características específicas das marcas utilizadas e não necessariamente dos produtos de forma geral. Dessa maneira, pode haver diferenças entre as características dos produtos referentes à produção industrial de cada fabricante e dos índices normativos.

Como os painéis possuem camadas não homogêneas, a Norma NBR 15220 (ABNT, 2005) define que sejam definidas seções com diferentes características e que seja feito o cálculo da área de cada uma delas. Denomina-se seção a uma parte de um componente tomada em toda a sua espessura (de uma face à outra) e que contenha apenas resistências térmicas em série. As seções consideradas nos painéis ensaiados são demonstradas na Figura 48.

A escolha das seções teve como parâmetro as distintas composições do painel. A seção (a) passa sobre a alma do perfil com espessura de 0,95 mm e foi considerada pela alta condutividade térmica do aço. A seção (c) também passa sobre o perfil considerando o restante da área do perfil e a seção (b) que não possui perfis de aço, somente revestimentos, acabamentos e preenchimento do miolo (Figura 48). A Tabela 19 informa as dimensões, área e quantas vezes as seções aparecem no painel (repetições).

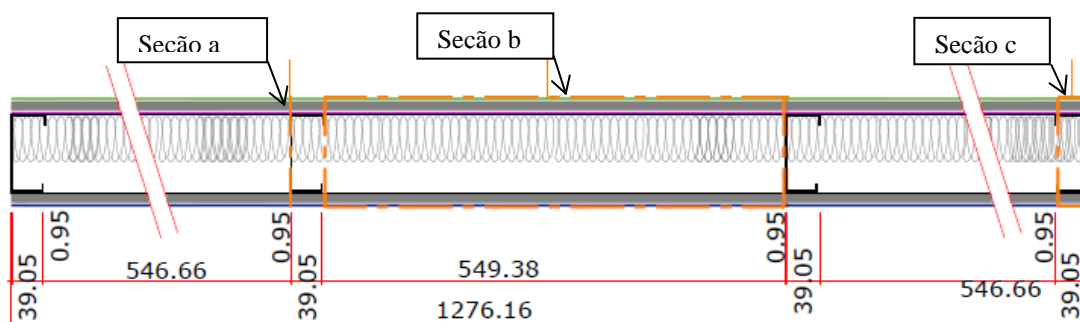


Figura 48: Planta do painel com apresentação das seções que serão calculadas, respectivas medidas e áreas. Fonte: Autor.

Tabela 19: Dimensões das seções consideradas para o cálculo da transmitância e capacidade térmica dos painéis. Fonte: Autor.

	Larg.(m)	Comprim. (m)	Area (m²)	Repetições	Área total (m²)
seção a	0,00095	1,20	0,00114	4	0,0045
seção b	0,54666	1,20	0,65592	3	1,9677
seção c	0,03905	1,20	0,04686	4	0,18744

3.4.1.1 Cálculo da Transmitância Térmica (U)

A Transmitância Térmica (U) é o inverso da Resistência Térmica Total (Eq.12) que por sua vez representa a soma da resistência da superfície externa e interna com a resistência de superfície a superfície que é determinada pela (Eq.13).

$$U=1/(R_T) \quad (\text{Eq.12})$$

Onde:

U= Transmitância Térmica do painel (de ambiente a ambiente)

R_T = Resistência Térmica Total (de ambiente a ambiente)

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (\text{Eq.13})$$

Onde:

R_t = Resistência térmica de superfície a superfície.

R_{se} e R_{si} = Resistências superficiais (externa e interna) obtidas da tabela A.1 da referida norma.

Na determinação dos valores a serem adotados para R_{si} e R_{se} (Tabela 20) considerou-se que a direção do fluxo de calor é horizontal e seus respectivos índices obtidos no Anexo A (normativo), Tabela A.1 da NBR15520-2 (ABNT, 2005) que especifica índices para fluxos horizontas, ascendentes e descendentes.

Tabela 20: Resistências consideradas para R_{si} e R_{se}. Fonte: NBR 15520 (ABNT 2005).

Resistência	Valor obtido m². K/W
Superficial interna (R _{si})	0,13
Superficial externa (R _{se})	0,04

A resistência térmica de superfície a superfície de um painel plano constituído de diversas seções não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, determinada pela (Eq.14).

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (\text{Eq.14})$$

Onde:

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do painel;

R_a, R_b, ... , R_n = resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção;

A_a, A_b, ..., A_n = áreas de cada seção.

O cálculo da resistência térmica de superfície a superfície de cada seção é dada pela soma das resistências dos materiais existentes naquela seção que é dado pela (Eq.15). E a resistência de cada material é dada pela (Eq.16).

$$R_{(a)} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{ar} + \dots R_n \quad (\text{Eq.15})$$

Onde:

$R_{(a)}$ = resistência superfície a superfície da seção A.

$R_1 + R_2 + \dots R_n$ = resistência de cada material que compõe a parede

R_{ar} = resistência da câmara do ar não ventilada (caso exista)

$$R_n = e / \lambda \quad (\text{Eq.16})$$

Onde:

R_n = resistência térmica da camada da parede ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$);

e = espessura da camada (m);

λ = condutividade do material da camada ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

A resistência da câmara de ar não ventilada foi obtida na Tabela B.1 do Anexo B (informativo) da NBR15520-2 (ANBT, 2005) que varia quanto à espessura da camada de ar e a emissividade do material. Foi considerada uma superfície de baixa emissividade e espessura variando entre 0 e 90 mm conforme a tipologia de cada painel.

3.4.1.2 Cálculo da capacidade térmica

Para o cálculo foram consideradas as seções pré-definidas anteriormente, lembrando que a capacidade térmica é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema representada pela (Eq. 17). A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela (Eq. 18).

$$C_{Tn} = \sum e_n \cdot c_n \cdot \rho_n \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

C_{Tn} = Capacidade Térmica do componente da parede ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

e_n = espessura da camada i (m)

c_n = Calor Especifico ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

ρ_n = densidade de massa aparente do material da camada i (kg/m^3)

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde:

C_T = Capacidade Térmica Total

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$ são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n),

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção.

Os valores da transmitância e da capacidade térmica foram comparados com os índices estipulados para o procedimento 1A na NBR 15575 (ABNT, 2013).

3.4.2 Experimento térmico

O objetivo do experimento é comparar o desempenho térmico dos diferentes tipos de painéis já que os materiais reciclados e resíduos não possuem informações e índices para cálculos térmicos e acústicos ou simulações em softwares.

3.4.2.1 Infraestrutura utilizada

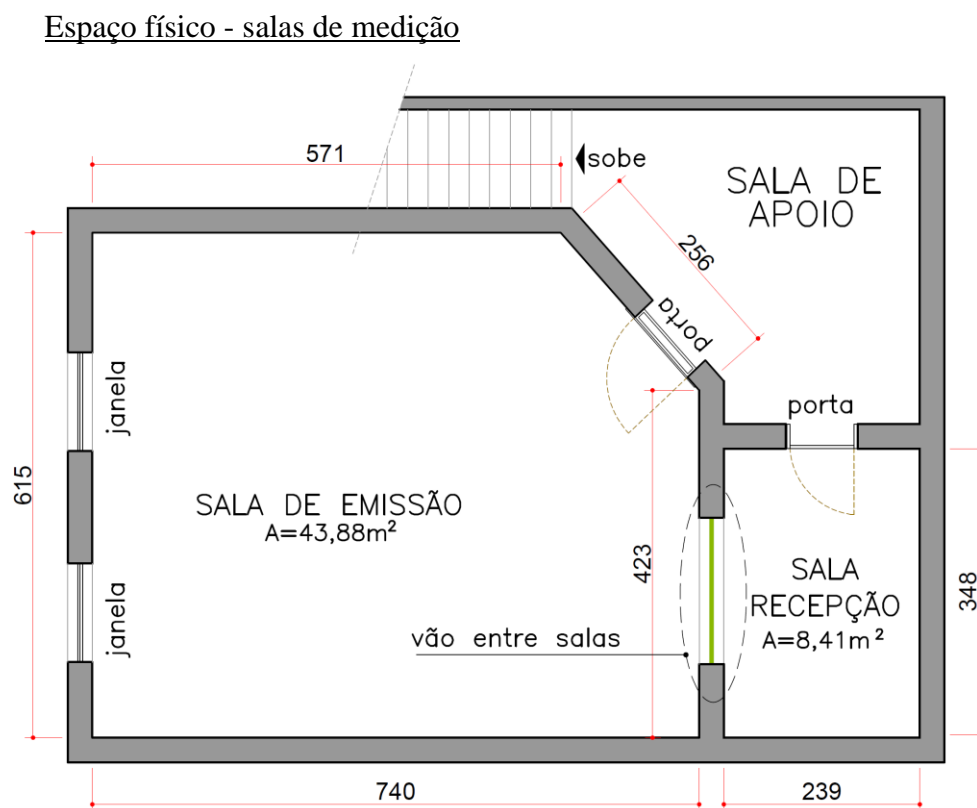


Figura 49: Planta do Laboratório do Departamento de Mecânica da UFPR. Fonte: Autor.

O laboratório de acústica do Departamento de Mecânica da UFPR está preparado para a execução de testes acústicos e em conjunto com os equipamentos de medição acústica foi gentilmente cedido para essa dissertação. Está sediado no Campus Politécnico da Universidade Federal do Paraná e possui dois ambientes que nessa dissertação serão denominados sala de emissão e sala de recepção (Figura 49).

A sala de emissão possui $43,88 \text{ m}^2$, duas janelas basculante com vedação acústica e vidros duplos na parede oposta ao vão e porta de acesso com isolamento acústico. A sala de recepção mede $8,49 \text{ m}^2$ e possui um poço de armazenamento e bombeamento de água localizado sob a sala que gera um ruído intermitente de gotas de água. Essas considerações feitas são importantes para a análise dos resultados acústicos. As duas salas estão ligadas a uma antecâmara que serve de apoio para os ensaios. A parede que divide a sala de recepção e medição possui uma abertura de $1,20 \text{ m} \times 1,78 \text{ m}$ e é neste vão que os painéis foram instalados (Figura 50).



Figura 50: Foto do vão entre as salas. Laboratório do Departamento de Mecânica da UFPR. Fonte: Autor.

Fonte de calor

Para os ensaios térmicos, foi necessária a confecção de uma fonte de calor que mantivesse a temperatura de uma das faces do painel constante por um determinado tempo, simulando uma fachada que recebe calor na face externa. A fonte de calor foi montada em uma estrutura de madeira (MDF) sobre cavalete com rodízio com $1,20 \text{ m} \times 1,78 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$, revestida internamente com papel aluminizado e 12 lâmpadas de 250 watts totalizando 3.000 watts, o que representa 1.449 watts/m^2 . O controle de temperatura e tempo da fonte de calor é feito por um termostato ligado a um disjuntor. A fonte de calor possui $2,13 \text{ m}^2$ que é exatamente o tamanho do vão entre as salas de emissão e recepção (Figura 51). A fonte era ligada antes do início dos ensaios e demorava aproximadamente 28 minutos para alcançar a temperatura de 80°C (temperatura de execução dos ensaios). O ensaio térmico iniciava após o atingimento de 80°C na superfície externa do painel. O termostato foi regulado para desligar quando a temperatura da superfície aquecida alcançasse 85°C e ligasse quando a temperatura da superfície estivesse a 75°C .



Figura 51: Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel. Fonte: Autor.

Câmera termográfica

A termografia é a técnica de produção de uma imagem a partir da radiação infravermelha que todos os corpos emitem devido às suas condições térmicas. A termografia utiliza câmeras termográficas que são calibradas a fim de garantir uma medida precisa da temperatura LAGUELA (2011).

Segundo a FLIR Instruments (2015), a câmera infravermelha é um dispositivo que captura a energia infravermelha (calor) emitida pelo objeto enquadrado e converte esta energia (concentrada pelas lentes em um detector infravermelho formado por milhares de sensores infravermelhos) em um sinal eletrônico. Esse sinal é processado de forma a mostrar a imagem térmica em um display ou monitor de vídeo ao mesmo tempo em que calcula a temperatura de cada pixel. A precisão de uma câmera infravermelha depende de vários componentes como as lentes, filtros, o detector, circuitos de leitura e tratamento de sinal e programas de linearização e compensação.

Para o experimento térmico foi utilizada a câmera Termovisor Flir E40 que reproduz imagens infravermelhas com 160 x 120 pixels (19.200), campo de visão de 25° x 19° e distância focal mínima de 0,4 m. A câmera possui sensibilidade térmica de 0,07 °C (70 mK) e fornece as imagens infravermelhas, imagens visuais, fusão de imagens PIP (Picture in Picture) e galeria de imagens em miniatura. A faixa de medição da temperatura é de -20°C à 650°C e possui uma precisão de temperatura de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$ da leitura, qual for maior (Figura 52a).

A análise da imagem infravermelha pode ser feita diretamente na câmera com medição de até três pontos móveis, três áreas móveis, três linhas móveis com detector

automático de ponto quente ou frio pré-determinado ou no software fornecido pelo fabricante que dispõe de mais opções de análise.

Termohigrômetro digital

De acordo com a Incoterm (2015), o termohigrômetro é um instrumento de medição das temperaturas e da umidade relativa do ar no ambiente onde está alocado. A umidade é a quantidade de vapor de água na atmosfera, sendo seu cálculo feito através da razão da quantidade de vapor de água presente numa porção da atmosfera, com a quantidade máxima de vapor de água que a mesma pode suportar a determinada temperatura.

O termo higrômetro utilizado possui a capacidade de armazenar os respectivos valores de máximos e mínimos alcançados ao longo de um período de tempo das temperaturas. Seu visor mostra a temperatura, umidade e a hora com unidade de medição de temperatura selecionável °C/°F (Figura 52b). (INCOTERM, 2015)



Figura 52: (a) Câmera FLIR E40. Fonte: FLIR Instruments (2015). (b) Termo higrômetro. Fonte: Incoterm (2015).

3.4.1.2 Procedimento de ensaio

A análise do desempenho térmico dos painéis comparou o aumento de temperatura da face interna dos painéis (sala de recepção) após o aquecimento da face externa (sala de emissão) com uma fonte de calor por tempo determinado. Para a análise foi necessário estipular: o tempo de aquecimento do painel, como registrar as informações da câmera termográfica e procedimentos dos ensaios.

A fonte de calor aquecia a face externa do painel (sala de emissão) até que o termostato preso a ela registrasse a temperatura de 80 °C. Os ensaios iniciavam quando o painel atingisse a temperatura de 80 °C, então, o termostato mantinha a fonte de calor oscilando entre 75 °C e 85 °C durante 60 minutos enquanto as fotos eram registradas.

Avaliação do tempo de execução do ensaio

Para estipular o tempo necessário de execução do ensaio fez-se uma simulação de aquecimento onde o painel foi exposto a uma temperatura de 80 °C durante 120 minutos e fotos infravermelhas foram tiradas a cada 10 minutos com a mira laser da câmera apontada para o centro do painel. O painel escolhido para o teste foi o MELX e as fotos fornecidas pela câmera termográfica foram registradas.

O ensaio gerou doze fotos que foram analisadas no software de leitura infravermelha fornecido pelo fabricante da câmera. Em cada foto, foi feita uma linha vertical no centro das imagens utilizando uma das ferramentas de medição do software. A linha é referenciada no software que fornece: a maior temperatura, a menor temperatura e uma média das temperaturas na linha. As médias de temperatura registradas foram transpostas para o gráfico que representa o aumento de temperatura na face interna (sala de recepção) por 120 minutos (Figura 53).

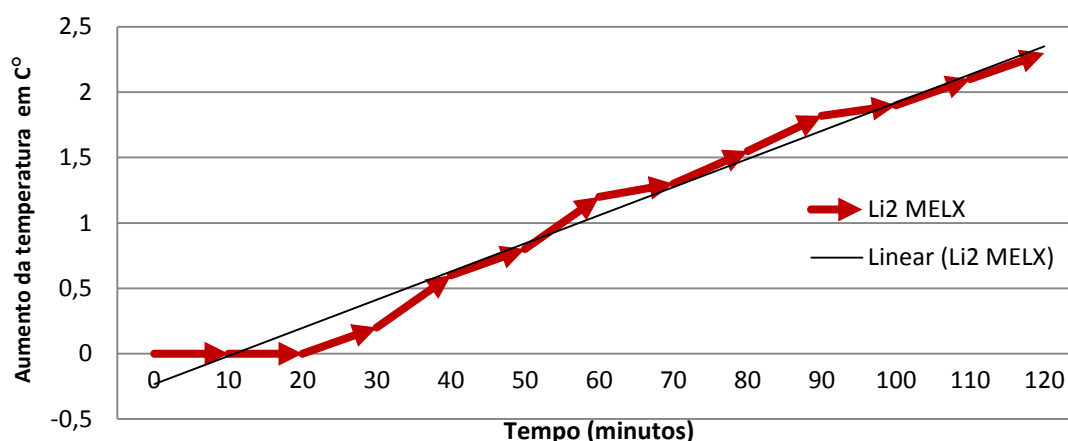


Figura 53: Painel MELX exposto a temperatura de 80 °C na face externa por 120 min com medição a cada 10 min. Fonte: Autor

Legenda: Li2 – linha vertical (centro no painel) MELX – Gesso moído no miolo, estuque sintético (acabamento externo) (E) , massa PVA látex como acabamento interno (L), sem banda acústica (X).

Para a obtenção do aumento da temperatura subtraiu-se as temperaturas observadas (10 min a 120 min) da temperatura inicial (tempo zero). Observa-se que a temperatura aumenta progressivamente e que a medição feita após 60 minutos de aquecimento da face externa representa uma amostra significativa, não sendo necessária uma exposição maior (Figura 53).

Para o monitoramento do aumento de temperatura durante os ensaios, foi então estipulado que as medições seriam feitas a cada 10 minutos durante o período de 60 minutos, totalizando sete medições com temperatura constante na face oposta de 80 °C.

Lembrando que os ensaios iniciavam somente quando a temperatura da face externa (sala de emissão) alcançasse 80 °C.

Registro das informações fornecidas pela câmera termográfica

O campo de visão da câmera termográfica é de 25° x 19° e não registra o painel em sua totalidade por conta das dimensões da sala de recepção. Para o registro termográfico na sala de recepção, foi necessário dividir o painel em seis partes e os pontos P1, P2, P3, P4, P5, P6 foram desenhados na chapa de gesso acartonado para posição da mira laser da câmera termográfica garantindo fotos semelhantes e referenciadas da superfície da placa (Figura 54a). Os campos de visão determinados pelos pontos possuem áreas em comum para uma possível sobreposição de fotos. O ponto P7 está localizado no centro do painel.

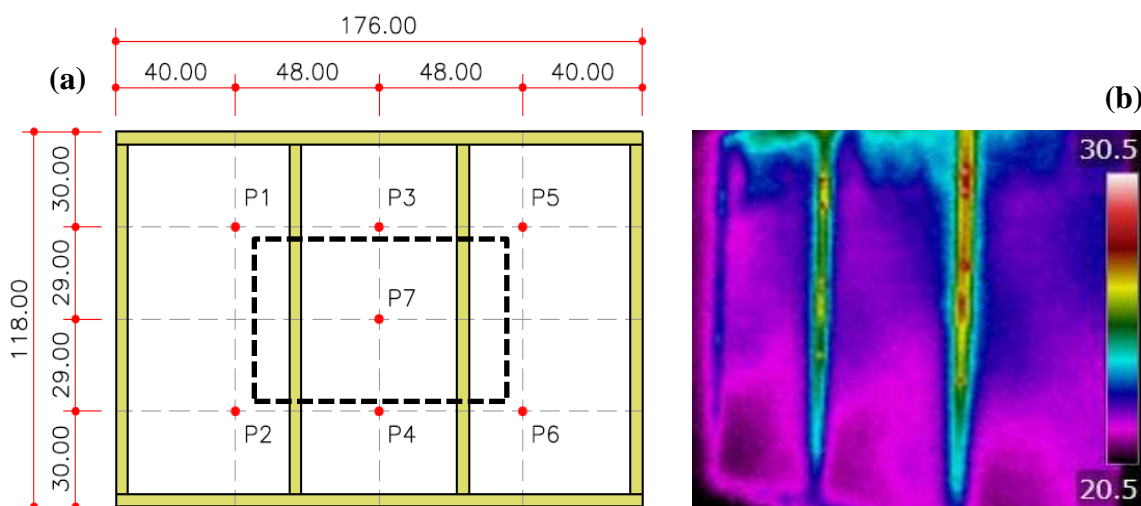


Figura 54: (a) Posição dos pontos para a mira a laser na face interna do painel (sala de recepção). Linha tracejada (área de abrangência do ponto P7). (b) Imagem do painel (sala de recepção). Fonte: Autor.

Na Figura 54b o painel é mostrado em sua totalidade com a câmera posicionada em ângulo (na porta da sala de recepção) e nela pode-se observar que o painel não possui aquecimento homogêneo e que existe uma diferença de temperatura entre as áreas com perfis e áreas sem perfis e entre a área inferior e superior do painel.

Por causa da heterogeneidade de aquecimento do painel, foi necessário realizar um procedimento que auxiliasse na avaliação das imagens registradas e como os resultados seriam comparados. O procedimento teve como base o painel VELX (interior com lâ de vidro, revestimento externo com estuque sintético e massa PVA látex na face interna). As fotos termográficas P1, P2, P3, P4, P5, P6 (Figura 56) e P7 (Figura 55) foram registradas e de cada foto foi analisado:

- temperatura máxima, mínima e média da área do retângulo (Ar1);

- temperatura máxima, mínima e média de linhas desenhadas sobre os perfis nitidamente mais aquecidos (Li1 e Li3) e linha no centro (Li2);
- temperatura no ponto central do painel (Sp1).

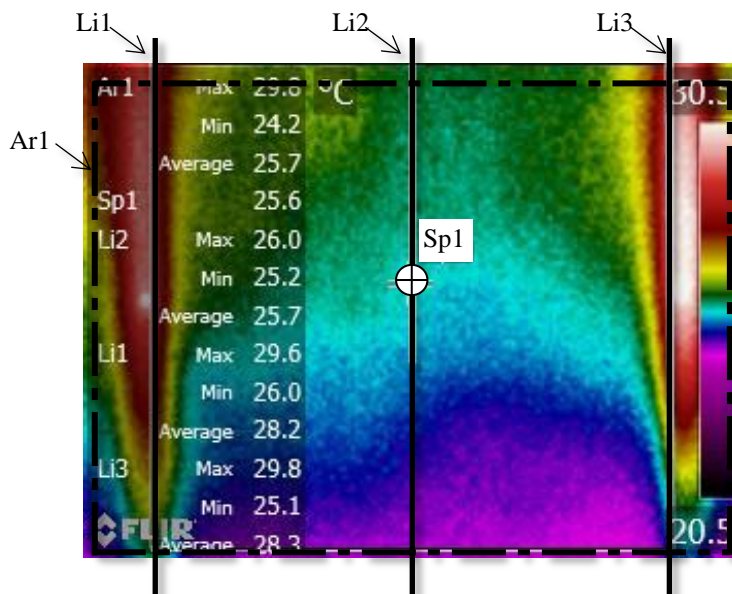


Figura 55: Imagem termográfica P7 fornecida pelo software da câmera após a inserção dos elementos (linhas, pontos e retângulo). Fonte: Autor.

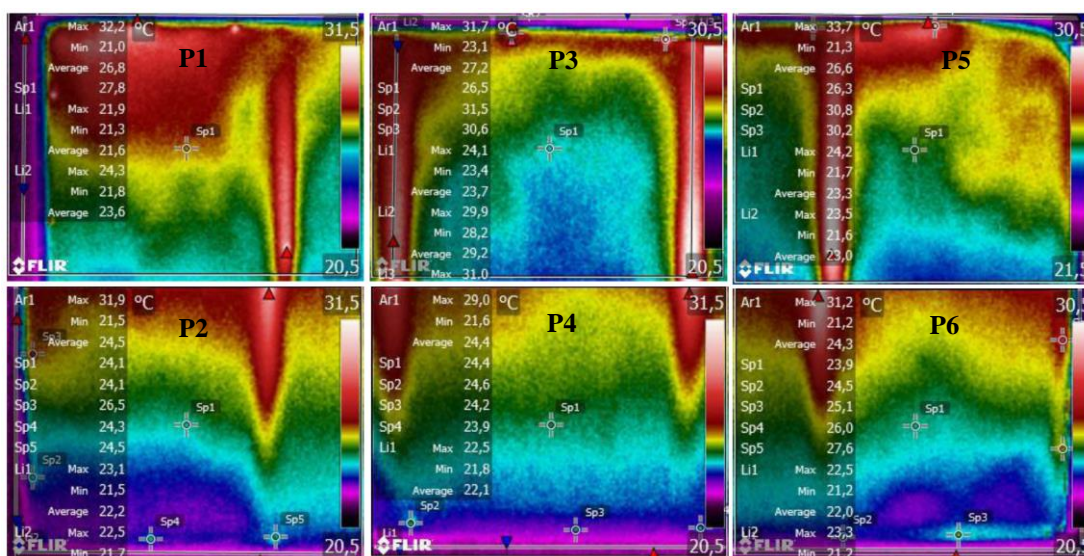


Figura 56: Imagem termográfica P1, P2, P3, P4, P5 e P6 fornecida pelo software da câmera após a inserção dos elementos (linhas, pontos e retângulos). Fonte: Autor.

A média da temperatura nos retângulos (Ar1) de P1 a P6 é 25,63 °C e no retângulo (Ar1) da foto P7 é 25,7 °C. Analisando as equivalências de temperatura adotou-se a foto P7 como padrão de análise dos painéis juntamente com os elementos Ar1, Li1, Li2, Li3 e Sp1 de referência no software de interpretação das imagens, além

disso, o sensor do termostato que registra a temperatura na face externa (sala de emissão) está posicionado na área de cobertura da P7.

Procedimentos de ensaio

Para a elaboração dos procedimentos de ensaio, o planejamento contou com o levantamento dos ruídos que poderiam interferir nos resultados e podem influenciar no desempenho do ensaio. Foram criados procedimentos na tentativa de minimizá-los:

- controle da temperatura ambiente;
- controle da umidade do ambiente;
- controle da intensidade dos sons externos;
- controle do local de colocação do sensor do termostato;
- controle do tempo de execução do teste para o registro das imagens;
- controle da inserção dos parâmetros de calibração dos equipamentos (câmera termográfica infravermelha, termo higrômetro e termostatos);
- vedação das frestas após a troca dos isolamentos e revestimentos; e
- controle da deformação e degradação da placa que era retirada para a substituição do miolo.

Para a formatação do ensaio foi criada uma rotina de ações que iniciava com a medição da temperatura e umidade das salas de emissão e recepção em pontos pré-determinados. A câmera termográfica e o termo higrômetro eram posicionados no centro das salas com o intuito de registrar a temperatura média e a umidade relativa do ar no início e fim do ensaio para verificação das condições ambientais.

Para minimizar as variações foi estipulado um padrão físico para os ambientes (janelas fechadas, luzes acesas e portas abertas, mobiliário e equipamentos das salas sempre na mesma posição) garantindo referências iguais de posicionamento de equipamentos mobiliário, iluminação e ventilação. Foi elaborada uma ficha padrão com o protocolo de verificação de cada item a ser controlado.

Após a conferência do ambiente, os equipamentos eram revisados e os parâmetros e índices conferidos e/ou inseridos:

- calibração da câmera termográfica infravermelha – distância do observador ao objeto observado (sala de emissão 3m e sala de recepção 1m) e a inserção dos índices de emissividade dos revestimentos (cerâmico – 0.95, placa de fibrocimento – 0.94, - argamassa seca – 0.94 e madeira – 0.91);

- calibração do termostato da fonte de calor com margem de 5° C, ou seja, ao alcançar 75° C o termostato é ligado e a 85° C desligado mantendo durante uma hora a temperatura em 80° C; e

- posicionamento do sensor do termostato no centro da placa cimentícia (área de abrangência da imagem P7).

Mesmo considerando apenas a imagem P7 para avaliação do aquecimento do painel, foram capturadas e registradas as fotos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 a cada 10 minutos durante os 60 minutos caso houvesse a necessidade de mais análises.

3.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO

3.5.1 Procedimento do ensaio

O experimento acústico foi realizado *in situ* utilizando-se o método da função de transferência e seguindo as metodologias e recomendações obtidas da literatura e na norma ISO 18233 que aborda medições utilizando métodos alternativos. Os resultados são válidos apenas para análise comparativa no experimento.

Resumidamente, os ensaios foram feitos através da técnica de deconvolução, que usa a varredura senoidal como sinal de excitação. Os resultados das funções de transferência foram processados para obter (em cada banda de frequência de 1/3 de oitava) o nível de pressão sonora médio na sala emissora, na sala receptora e o tempo de reverberação na sala receptora.

Segundo Prestes (2015), para obtenção da função de transferência foi utilizado o sinal de excitação com varredura de senos, método mais recomendado para medições acústicas, conforme aponta Müller e Massarani (2001). Esse método consiste em gerar um sinal constituído de uma função harmônica com frequência variante, de modo que todas as frequências do sistema sejam suficientemente excitadas.

Neste método é utilizada a transformada rápida de Fourier e sua inversa (FFT e IFFT) para converter a resposta entre os domínios do tempo e da frequência. Outra técnica utilizada é a janela, que tem a função de eliminar do resultado as distorções harmônicas geradas pelos alto falantes. Essas distorções, por consequência do método, são facilmente identificadas, pois se concentram em um intervalo de tempo no final da

resposta ao impulso. Com relação à medição do tempo de reverberação da sala receptora, o parâmetro será obtido através da resposta ao impulso do sistema.

Os ensaios térmicos e acústicos foram realizados em datas diferentes para garantir que o painel estivesse sob a influência da temperatura ambiente e não aquecido pela fonte de calor utilizada no experimento térmico.

3.5.2 Infraestrutura utilizada

- Amplificador de potência, AMPLI 12, marca 01dB, potência 250 rms;
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica, OMNI12, marca 01dB;
- Microfone de medição acústica, marca 01dB mce 212 e pré-amplificador G.R.A.S. Type 26ca;
- Amplificador e condicionador de sinais 01dB OPUS;
- Placa conversora de sinais analógico-digital e digital-analógico Roland Quad-Capture;
- Computador com Matlab e o ITA-Toolbox instalados. Geração, aquisição e processamento de sinais.

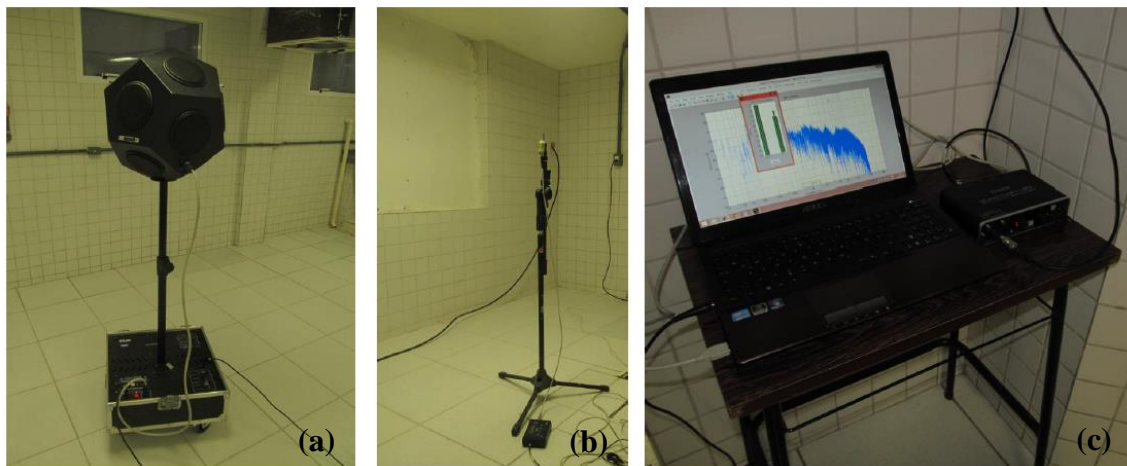


Figura 57: (a) Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01db. (b) Microfone de medição acústica 01db mce 212. (c) Computador com Matlab e o ITA—Toolbox. Fonte: Autor.

De acordo com Prestes (2015), para realizar o experimento com o método da função de transferência utilizou-se o ITA-Toolbox, pacote de programa desenvolvido no Matlab pelo instituto de acústica (Institut für Technische Akustik - ITA) da universidade RWTH-Aachen. Esse programa controla o sinal de excitação enviado à fonte sonora e

capta-se o sinal do microfone. A partir desses sinais o programa calcula a função de transferência de cada medição e o resultado é salvo em um arquivo do programa.

Segundo Prestes (2015) com o ITA-Toolbox são realizadas janelas na resposta ao impulso, obtidas de forma a excluir distorções e não linearidades da medição. O resultado dessa operação é filtrado em bandas de 1/3 oitava. Em seguida, as rotinas desenvolvidas por Prestes (2015) no Matlab calculam a energia de cada uma das medições em cada banda de frequência. Então é calculada a média das energias de cada sala analisada para o cálculo da diferença de nível sonoro. O tempo de reverberação é calculado pelo ITA-Toolbox e seus resultados são incluídos na diferença de nível padronizada. Finalmente é calculada a incerteza associada às medições.

3.5.3 Caracterização do experimento

Conforme citado anteriormente, o teste foi realizado no laboratório de vibrações e ruído da UFPR que está localizado no subsolo e tem características de uma câmara reverberante com estrutura básica para ensaios acústicos ainda não qualificados.

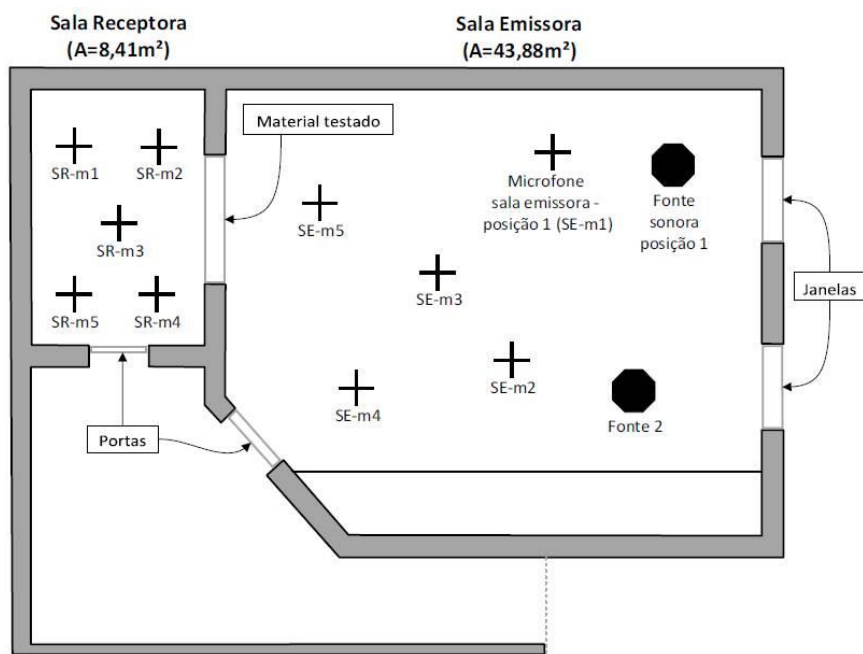


Figura 58: Planta das salas de emissão e recepção e equipamentos acústicos. Fonte: Autor.

Para determinar a diferença de nível, os ensaios foram realizados para cinco posições diferentes do microfone em cada sala e em duas posições da fonte sonora na sala emissora (Figura 58). Isso é válido para todas as medições, exceto para o teste de repetibilidade, no qual foram repetidas 10 medições nos pontos SE-m3 e SR-m3. Para a

medição da reverberação na sala receptora, a fonte sonora foi posicionada nos pontos SR-m1 e SR-m4.

3.6 ANÁLISE HIERÁRQUICA

O objetivo da utilização da análise hierárquica é apontar qual composição para a vedação externa vertical é mais adequada levando em consideração os critérios de desempenho térmico, desempenho acústico e custo de implantação do subsistema de vedação de LSF.

A utilização de um método multicriterial de auxílio à tomada de decisão se justifica pelo fato dele considerar critérios quantitativos e qualitativos simultaneamente na análise e ao mesmo tempo incorporar a experiência e a preferência do tomador de decisão tornando a escolha bastante consistente e confiável (LISBOA, 2002).

A AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é a construção de uma matriz que contenha o valor relativo de diversos aspectos a fim de, por exemplo, julgar qual item ou qual solução é a mais viável e eficiente em determinado caso. O processo é, portanto, hierárquico, e começa com a atribuição de importância relativa. Tem sido utilizado desde sua criação por Thomas Saaty no ano de 1977 como auxílio à tomada de decisões por diversas esferas (LISBOA, 2002).

No Método de Análise Hierárquica, as alternativas e os atributos necessários para julgar as alternativas se estruturam em uma hierarquia. No nível mais elevado fica o principal objetivo do problema de decisão. Este deve ser decomposto em vários níveis inferiores de atributos que pode ser subdividido, gerando uma árvore com vários níveis. O cálculo da hierarquia é realizado de maneira ascendente. O tomador de decisões compara todos os pares de atributos em cada nível, começando pelos atributos elementares e subindo pela hierarquia até o atingimento do objetivo (SAATY, 1987).

Para a definição da significância relativa entre atributos foi utilizada a escala de comparação sugerida na ASTM E 1765-2011 que é uma escala comum adaptada de Saaty (Tabela 21).

Tabela 21: Tabela com os valores paritários

Julgamento Paritário	Peso
A tem igual importancia que B	1
A levemente mais importante que B	3
A mais importante que B	5
A muito mais importante que B	7
A extremamente mais importante que B	9

De acordo com Coyle (2004), como todos os métodos de modelagem, a AHP tem pontos fortes e fracos. A principal vantagem da AHP é a sua capacidade para classificar escolhas na ordem da sua eficácia no cumprimento dos objetivos conflitantes. Se as decisões tomadas sobre a importância foram feitas de boa fé, os cálculos de AHP levarão inexoravelmente a consequência lógica dessas decisões. Sua maior habilidade é a sua capacidade de detectar julgamentos inconsistentes.

Segundo Coyle (2004), uma das limitações da AHP é que ela só funciona porque as matrizes são todas da mesma forma matemática - conhecida como uma matriz recíproca positiva. Tal matriz exige que, se usarmos o número 9 para representar que A é absolutamente mais importante do que B, então nós temos que usar 1/9 para definir importância relativa de B em relação a A.

Para compor a matriz foram estipulados parâmetros para os critérios que compõem a matriz hierárquica:

- Desempenho térmico – os parâmetros utilizados para esse critério foram os resultados quantitativos obtidos no experimento térmico que mediu a diferença de temperatura no início do ensaio e após 60 minutos de aquecimento sendo que quanto menor a diferença entre o início e fim do experimento, melhor o isolamento.

- Desempenho acústico – para este critério foram utilizados os resultados quantitativos obtidos no experimento acústico que dispõe sobre a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) sendo que quanto maior o valor em decibéis, mais isolante é o painel e por consequência, melhor.

- Custo - os parâmetros utilizados para esse critério foram os resultados quantitativos obtidos com o levantamento dos preços de aquisição dos materiais e mão de obra sendo que quanto menor o custo do painel, melhor.

Nos resultados do desempenho acústico foi aplicada a proporção inversa ($1/x$), pois somente esse critério possui a característica de “quanto maior, melhor”, enquanto que os outros critérios são classificados como “quanto menor, melhor”.

Para cada painel é aplicada a (Eq. 19) onde PV (peso da variável) modifica seguindo os critérios estipulados para cada análise hierárquica. O valor é transformado em porcentagem apresentando um ranking dos painéis e foi aplicada em todos os cenários sugeridos na dissertação.

$$\text{Painel}_{(x)} = (\text{PV} \times \text{result.térmico}_{(x)}) + (\text{PV} \times 1/\text{result acústico}_{(x)}) + (\text{PV} \times \text{custo}_{(x)}). \quad (\text{Eq. 19})$$

Para atender a diversidade construtiva em que o LSF pode se enquadrar, foram criados três cenários distintos que utilizam o Processo de Análise Hierárquica (AHP) para a tomada de decisões sendo que cada uma deles prioriza um dos critérios analisados nessa dissertação: desempenho térmico, desempenho acústico e custo:

- Cenário 1 - considera o desempenho térmico como prioridade.

O primeiro cenário está justificado nas argumentações sobre o desempenho global de energia, pois como citado anteriormente, e explicitados por Amundarain (2007), as paredes externas e seu desempenho térmico contribuem para o desempenho global de energia em uma residência evitando trocas de calor. Ao melhorar as propriedades de isolamento térmico das paredes externas, conseguem-se melhorias na sustentabilidade da construção.

O desempenho térmico é o critério de maior relevância, seguido pelo desempenho acústico e por último o custo, já que este pode ser considerado um investimento inicial que se dilui durante a vida útil da residência com a economia de climatizadores mecânicos. A Tabela 22 contém os pesos para o julgamento dos critérios de análise e a Figura 59 os resultados obtidos na forma de diagrama.

Tabela 22: Matriz da análise hierárquica tendo o critério de desempenho térmico como sendo o mais importante. Fonte: Autor.

	Des. Térmico (T)	Des. Acústico (A)	Custo (C)	Total Linha T1	Peso Variável (PV)	Parâmetro
Des. Térmico (T)	1,00	3,00	7,00	11,00	0,65	Menor é melhor
Des. Acústico (A)	1/3	1,00	3,00	4,33	0,26	Maior é melhor
Custo (C)	1/7	1/3	1,00	1,48	0,09	Menor é melhor
Soma	1,48	4,33	11,00	16,81		

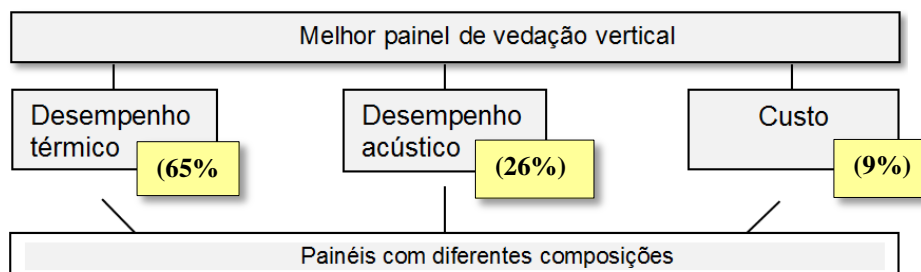


Figura 59: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o desempenho térmico como critério mais importante. Fonte: Autor.

Para validação da matriz AHP foi feito o cálculo de verificação de sua consistência, sendo recomendado um valor igual ou inferior a 0,1. No caso da matriz sugerida o valor da RC (Razão de Consistência) é igual a 0,006 quando aplicado o

Índice de Consistência Randômico (IR) de 0,58 que corresponde a uma matriz de ordem três, validando os julgamentos realizados.

- Cenário 2 - considera o desempenho acústico como prioridade.

Justifica-se em locais onde o nível de ruído é excessivo exigindo um isolamento acústico melhor para os painéis externos. Para esse caso, tem-se que o desempenho acústico é mais importante que o desempenho térmico e que quando comparado ao custo é muito mais importante. Já o desempenho térmico quando comparado ao custo é mais importante. Esta hipótese está representada na matriz de decisão (Tabela 23) e seus índices multiplicadores apresentados sobre forma de diagrama na Figura 60. Para essa análise o valor do RC (Razão de Consistência) é também 0,006.

Tabela 23: Matriz da análise hierárquica tendo o critério de desempenho acústico como sendo o mais importante. Fonte: Autor.

	Des. Térmico (T)	Des. Acústico (A)	Custo (C)	Total Linha T1	Peso Variável (PV)	Parâmetro
Des. Térmico (T)	1,00	3,00	7,00	11,00	0,65	Menor é melhor
Des. Acústico (A)	1/3	1,00	3,00	4,33	0,26	Maior é melhor
Custo (C)	1/7	1/3	1,00	1,48	0,09	Menor é melhor
Soma	1,48	4,33	11,00	16,81		

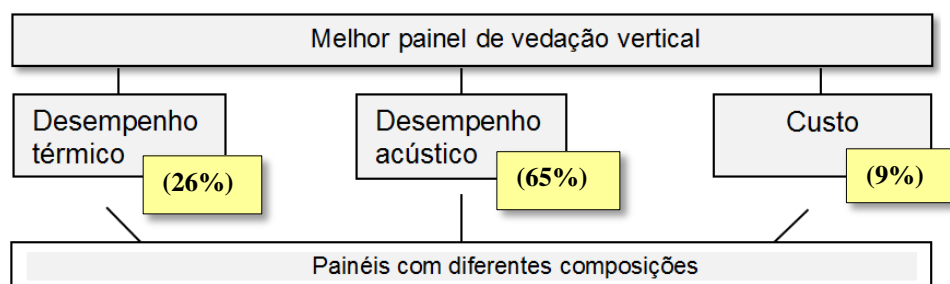


Figura 60: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o desempenho acústico como critério mais importante. Fonte: Autor

- Cenário 3 - considera o custo à prioridade

Para casos onde não exista a necessidade de conforto térmico ou acústico como em depósitos, espaços industriais, etc.

Neste caso o custo é extremamente mais importante que o desempenho térmico e que quando comparado ao desempenho acústico é muito mais importante. Já o desempenho térmico quando comparado ao desempenho acústico é mais importante e está representado na matriz de decisão apresentada na Tabela 24 e seus índices

multiplicadores apresentados na Figura 61. Para esse cenário, o valor do RC (Razão de Consistência) é 0,07.

Tabela 24: Matriz da análise hierárquica tendo custo como sendo o mais importante. Fonte: Autor.

	Custo (C)	Des. Térmico (T))	Des. Acústico (A)	Total Linha T1	Peso Variável (PV)	Parâmetro
Custo (C))	1,00	7,00	9,00	17,00	0,75	Menor é melhor
Des. Térmico (T))	1/7	1,00	3,00	4,14	0,18	Maior é melhor
Des. Acústico (A)	1/9	1/3	1,00	1,48	0,06	Menor é melhor
Soma	1,25	8,33	13,00	22,59		

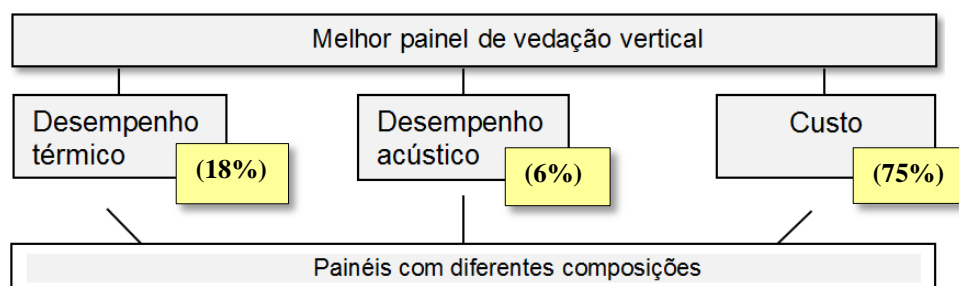


Figura 61: Diagrama com os critérios para a análise hierárquica tendo o custo como critério mais importante. Fonte: Autor.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO SEGUNDO PROCEDIMENTO 1A (SIMPLIFICADO – NORMATIVO)

Os cálculos da transmitância e capacidade térmica dos painéis consideraram as propriedades indicadas pelos fabricantes e os oferecidos na NBR 15520 (ABNT, 2005). Os resultados dos painéis aparecem na Tabela 25 com exceção do painel MELX (interior com gesso moído), FELX (interior com fibra cerâmica) e VECX (massa com pedaços de celulose) por falta de informações sobre suas características térmicas (condutividade e calor específico) para as densidades utilizadas.

Tabela 25: Resultados dos cálculos de transmitância e capacidade térmica dos painéis. Fonte: Autor.

Painéis	Capacidade térmica (C) kJ/(m ² .K)	Valor máximo para a capacidade térmica kJ/(m ² .K) Zonas 1,2,3,4,5,6 e 7	Transmitância térmica (U) (W/(m ² .K))	Valores máximos para a Transmitância térmica (U) (W/(m ² .K))		
				Zonas 1 e 2	Zonas 3,4,5,6,7 e 8	
					$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
XXXX	127	C ≤ 130	2,5	U ≤ 2,5	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5
XEXX	129		2,5			
XELX	131		2,5			
PELX	132		2,1			
RELX	140		0,7			
VELX	137		0,5			

Onde α^a - é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

A determinação do índice de transmitância depende da absorvância a radiação solar. Na Tabela B.2 da NBR15520 (ABNT, 2005) são apresentados índices de absorvância à radiação solar (α) de alguns tipos de superfície sendo que quanto mais escura é a cor, maior é seu índice de absorvância. Por exemplo, para a caiação nova, pintura na cor branca, amarela, verde clara e cinza claro a absorvância é 0,15, 0,30, 0,40 e 0,41, respectivamente. E para pintura na cor verde escura, vermelha e preta a absorvância é de 0,70, 0,74 e 0,97, respectivamente.

Os painéis calculados apresentaram valores de transmitância dentro do exigido pela norma, mesmo quando não foram usados isolantes térmicos em seu interior

(painéis XXXX, XEXX e XELX). Os resultados melhoraram significativamente quando quando os isolamentos foram instalados no interior do painel.

Já no cálculo da capacidade térmica os painéis XXXX e XEXX foram os únicos que não atingiram o limite mínimo exigido pela norma.

O painel XELX possui índices muito próximos dos limites estipulados na norma e serviu de base comparativa para os painéis que não possuem propriedades térmicas conhecidas e que, por este motivo, não participaram dos cálculos normativos.

Os resultados para a transmitância e capacidade térmica dos painéis foram organizados em um diagrama de dispersão apresentado na Figura 62 permitindo que se faça uma regressão linear que mostra o relacionamento médio entre as duas variáveis. É possível verificar que há correlação forte entre os critérios. Nesse caso o valor de R^2 é de 0,89 significando que 89% da variação de Y é explicada pela regressão. Para uma análise mais representativa da realidade, o painel XXXX (círculo vermelho na Figura 62) que não possui acabamento nem isolamento foi retirado do diagrama de dispersão e nessa análise o R^2 é de 0,93.

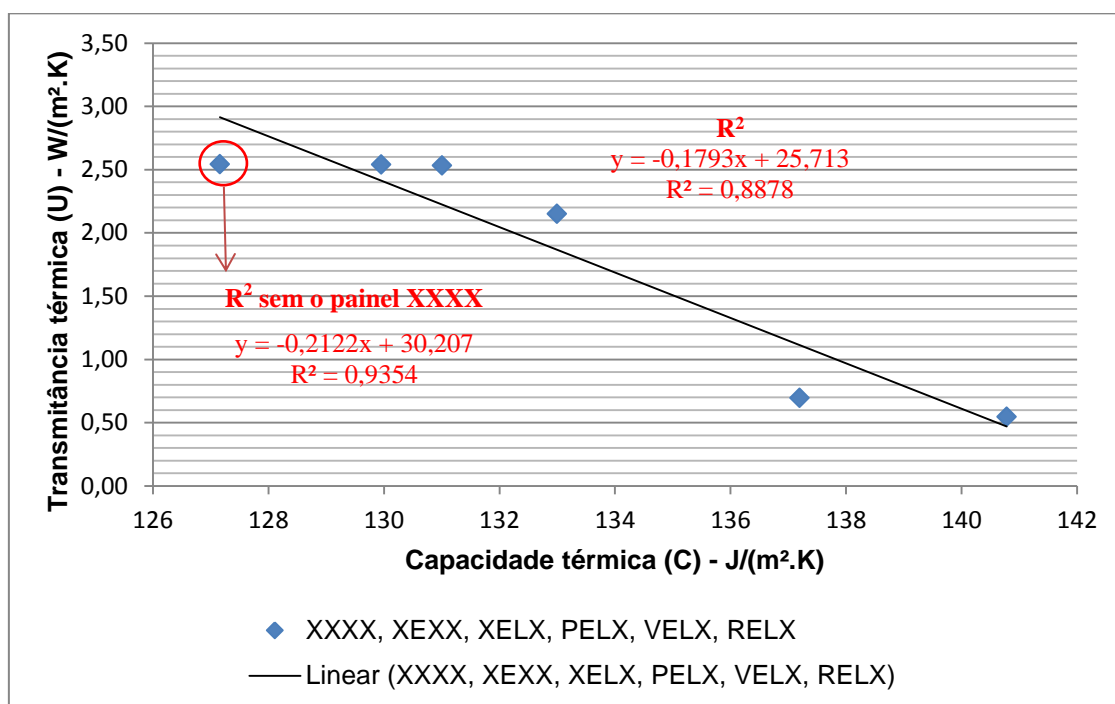


Figura 62: Relação entre a transmitância térmica e a capacidade térmica dos painéis com propriedades térmicas calculadas. Fonte: Autor.

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS PAINÉIS SEGUNDO O EXPERIMENTO

A análise dos resultados obtidos no experimento foi feita considerando a temperatura sobre os perfis (linha Li1 e Li3) e no centro do painel (linha Li2) sendo que o resultado apresentado nos gráficos para as linhas Li1 e Li3 é a média entre elas. Os gráficos expõem a variação (aumento) de temperatura entre o início (0 minuto) e o final do ensaio (60 minutos) registrados a cada 10 minutos com temperatura constante de 80 °C na face oposta a face fotografada pela câmera termográfica.

A Figura 63 demonstra o aumento de temperatura no painel XXXX no início e fim do experimento, a inserção das linhas de análise e seus resultados. A linha Li2 teve registrou a temperatura inicial (tempo 0 minuto) máxima de 22,1 °C, mínima 21,7 °C e média de 21,9 °C (Figura 63a). A imagem após 60 minutos de aquecimento obteve 41,6°C de máxima, 36,2°C de mínima e 39,5°C de média (Figura 63b). O cálculo da variação de temperatura na linha Li2 é a diferença entre as médias (39,5 °C – 21,9°C) que nesse caso é de 17,6 °C. Este padrão de coleta de dados foi seguido em todo o procedimento de análise. Nota-se a diferença de temperatura após 60 minutos de aquecimento e a heterogeneidade de temperatura no painel.

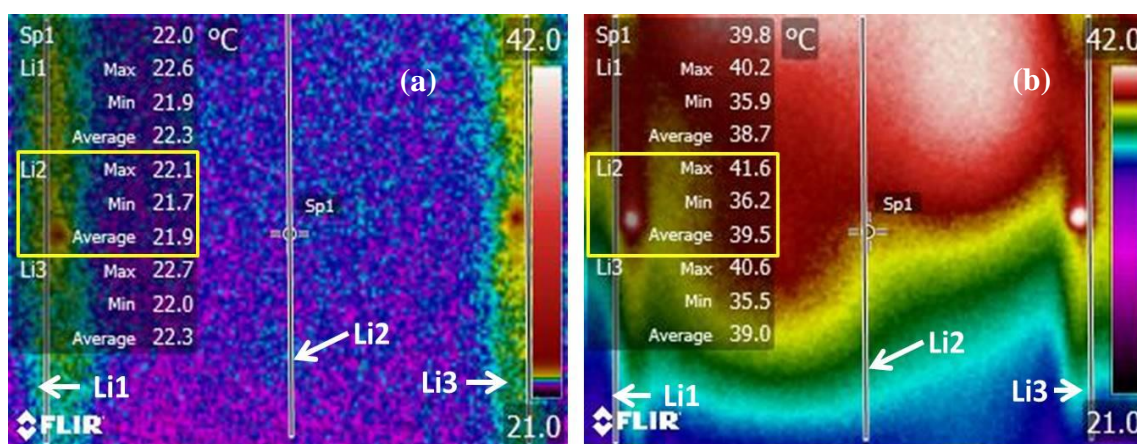


Figura 63: Fotos termográficas do painel XXXX. (a) no início do ensaio e (b) após 60 minutos de ensaio. Li2 (linha no centro do painel) e Li1 e Li3 (linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

- 1º letra = material no interior do painel (V, R, P, F,M ou X)
- 2º letra = material de acabamento na face externa (E ou X)
- 3º letra = material de acabamento na face interna (L, C ou X)
- 4º letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis (B ou X)

Existe uma diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior em todos os painéis ensaiados. Nos painéis XXXX, XEXX e XELX que possuem uma câmara de ar em seu interior e nenhum tipo de isolamento, essa característica é mais acentuada. Como a densidade do ar aquecido é menor, suas moléculas ficam mais afastadas entre si e tendem a subir. O aquecimento da superfície do painel provoca a movimentação do ar onde a parte mais quente torna-se mais leve e sobe.

O gráfico (Figura 64) avalia a propriedade térmica das massas de acabamento sem a instalação dos isolamentos no interior do painel, sabendo que esses painéis estão no limite permitido quanto aos índices de transmitância térmica calculado.

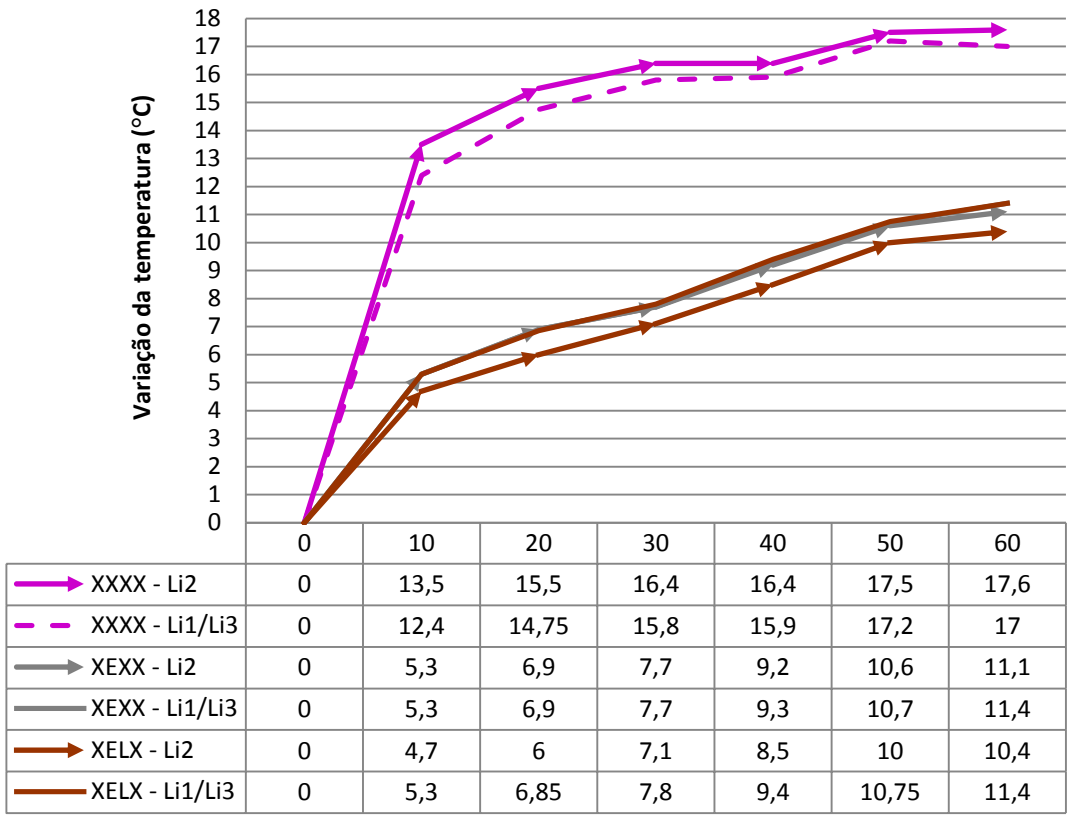


Figura 64: Gráfico que relaciona a variação de temperatura nos painéis XXXX, XEXX e XELX durante 60 minutos nas linhas Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

- 1^o letra = material no interior do painel (V, R, P, F,M ou X)
- 2^o letra = material de acabamento na face externa (E ou X)
- 3^o letra = material de acabamento na face interna (L, C ou X)
- 4^o letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis (B ou X)

A diferença entre os painéis XEXX e XELX é apenas a presença da camada de revestimento látex PVA na face interna. Observa-se que ambos os resultados de evolução de temperatura são bem semelhantes, o que demonstra boa repetibilidade do

processo de ensaio utilizado e que a massa látex não exerce influência no desempenho térmico do painel.

O painel XXXX obteve um aumento de temperatura na Li2 (centro do painel) de 17,6 °C após 60 minutos de aquecimento enquanto que o painel XELX apenas 10,4 °C. É possível afirmar que o painel cru (sem acabamentos) teve seu desempenho térmico melhorado em 69% com acréscimo do estuque sintético na face externa e massa PVA látex na face interna.

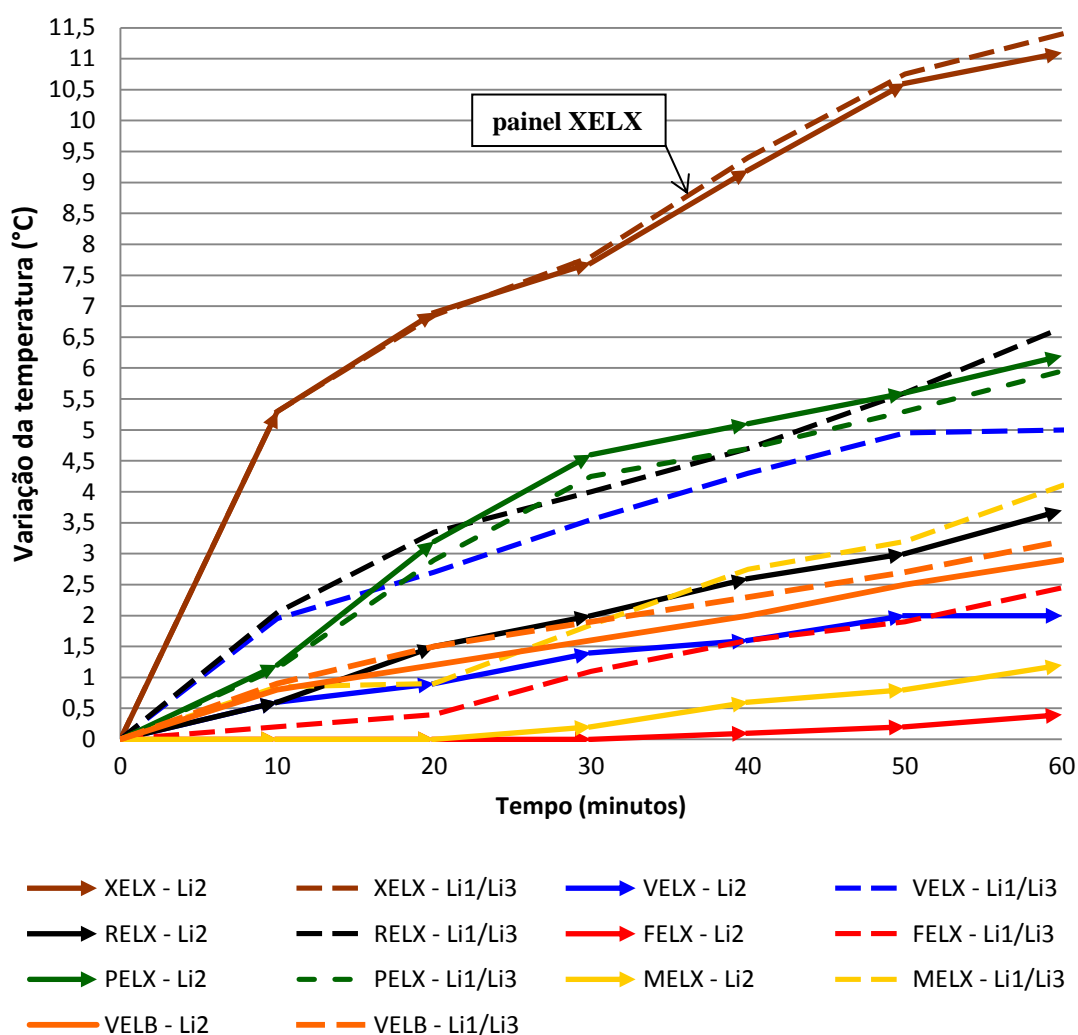


Figura 65: Gráfico com a diferença de temperatura dos painéis com material de isolamento em seu interior após 60 minutos. Linha Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

1º letra = material no interior do painel (V) Lã de vidro, (R) lã de rocha, (P) pedaços de gesso acartonado, (F) fibra cerâmica, (M) gesso moído ou (X) inexistente;

2º letra = material de acabamento na face externa (E ou X)

3º letra = material de acabamento na face interna (L, C ou X)

4º letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis (B ou X)

Comparando-se a Figura 64 e a

Figura 65 percebe-se uma significativa melhora após a inserção dos materiais no interior do painel. O painel PELX obteve o pior desempenho comparado a todos os que possuem isolamento, mas quando comparado ao painel XELX (que está no limite normativo permitido) constata-se uma melhora no desempenho de 80%. O painel PELX possui a melhor forma de reciclagem. O material pode ser reutilizado sem gasto de energia com moagem e transporte e uma opção útil para o resíduo gerado na obra. Este modelo de reciclagem pode ser empregado em pequenas superfícies eliminando os pedaços de gesso acartonado de lixos e aterros.

Nos painéis sem material isolante no interior (Figura 64), o aumento de temperatura na região dos perfis metálicos (Li1/Li3) é de 17 °C no painel XXXX e 11,4°C nos painéis XEXX e XELX. Já nos painéis com material isolante (

Figura 65) a região dos perfis aqueceu menos. No painel RELX aqueceu 6,65 °C, no painel VELX 5 °C, no painel PELX 5,95 °C, no painel MELX 4,1°C e no painel FELX 2,54°C. Esses índices indicam que o preenchimento do interior do painel com isolamento influencia na ponte térmica que acontece na área dos perfis e que quanto melhor o desempenho do material, menor será ponte térmica metálica.

O painel FELX com fibra cerâmica em seu interior possui o melhor desempenho térmico com variação de apenas 0,4 °C durante os 60 minutos de aquecimento. O problema desse material está em conseguir quantidade suficiente para viabilizar seu uso em escala industrial. A empresa Perfil Térmico que trabalha com isolamento térmico industrial oferece às indústrias do mesmo ramo um serviço de política reversa, tratando do fluxo físico da fibra cerâmica e sua correta destinação. Ela recolhe na região sul e em São Paulo, aproximadamente 8.000 m³/ano.

A casa tipo CT2-33 oferecida no programa Minha Casa Minha Vida pela COHAB-CT (Companhia de Habitação Popular de Curitiba) possui 33 m² e o volume necessário para preenchimento do interior das paredes externas é de aproximadamente 5,6 m³ por unidade. O resíduo do material não tem potencial para produção em larga escala, mas o volume arrecadado seria compatível com a construção de 1.428 residências tipo CT2-33 em programas governamentais específicos, por exemplo.

O painel RELX com 7 cm de lã de rocha aqueceu 3,7 °C enquanto o painel VELX com lã de vidro de 5 cm aqueceu 2 °C. O painel MELX, que possui em seu miolo gesso moído ocupando todo o vão, com espessura de 9 cm, obteve melhor desempenho quando comparado aos painéis com as lãs industrializadas com variação de temperatura de 1,2 °C.

Como as espessuras são diferentes e não foi possível determinar a capacidade e a transmitância térmica do gesso moído, não é possível afirmar se o seu melhor desempenho foi devido à característica física do material ou pela espessura. Mas acredita-se que ambas as coisas influenciaram positivamente, pois o gesso acartonado moído é composto de papel kraft picado misturado com gesso (que possui duas moléculas de água em sua composição) com alta porosidade, ou seja, várias características favoráveis a um bom desempenho térmico mostrando-se útil para esta finalidade e com vantagens ambientais e de custo às demais alternativas.

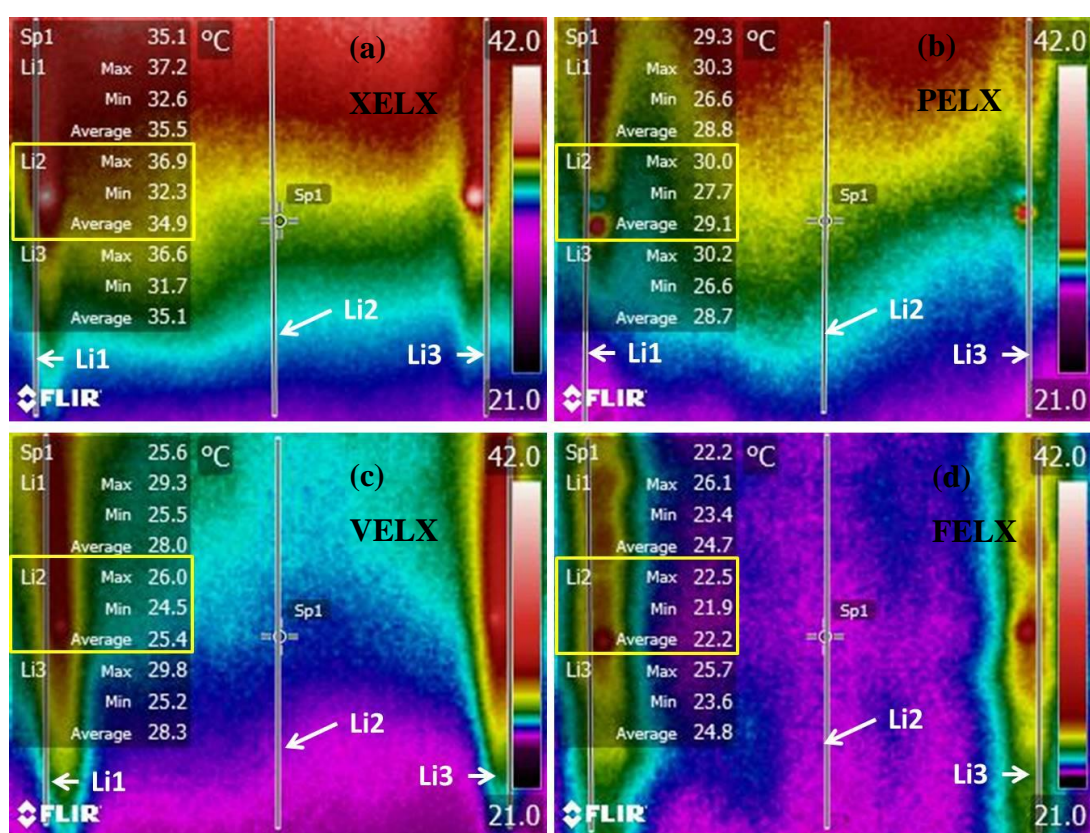


Figura 66: Fotos termográficas (60 min de aquecimento). (a) XELX, (b) PELX (c) VELX e (d) FELX. Linha Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.

Na foto termográfica (Figura 66) é possível comparar visualmente a diferença de temperatura após 60 minutos de aquecimento. No painel XELX (Figura 66a), limítrofe para o atendimento dos critérios normativos, a média de temperatura na linha central é 10,4 °C e no painel PELX (Figura 66b) é 6,2 °C. O painel com interior de lã de vidro (VELX), tipologia mais utilizada no Brasil, obteve um aumento de temperatura na central de 2 °C e o painel FELX 0,3 °C.

Tendo como parâmetro os valores de transmitância e capacidade térmica do painel VELX que são $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $137 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ respectivamente, pode-se afirmar que o painel FELX possui isolamento muito superior e que sua utilização pode aprimorar estudos bioclimáticos de fachadas onde se necessita de maior isolamento, resultando em construções com grande eficiência térmica.

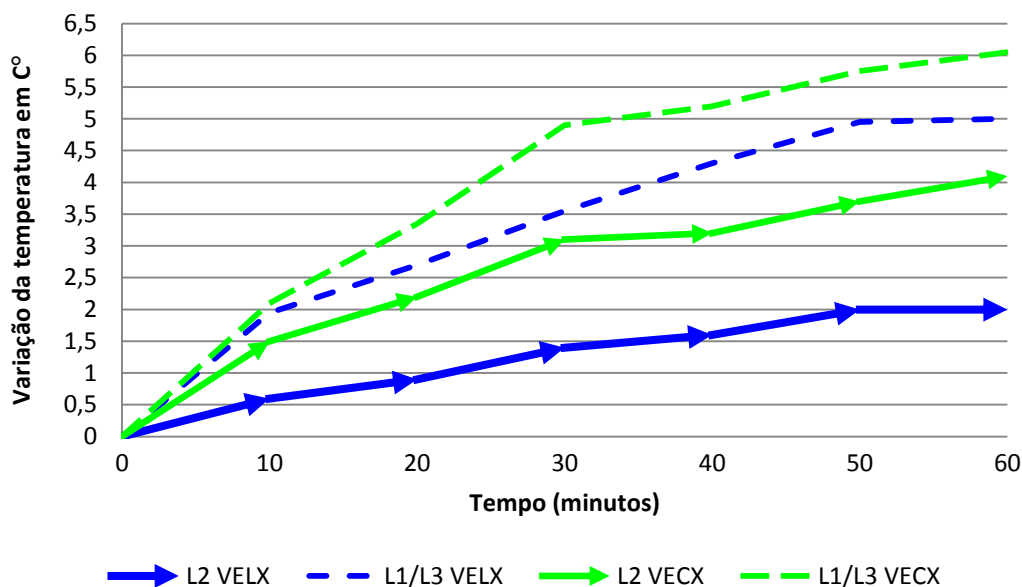


Figura 67: Diferença de temperatura dos painéis com diferentes massas de acabamento interno após 60 minutos. Linha Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis). Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

1ª letra = material no miolo: (V) Lã de vidro;

2ª letra = material de acabamento na face externa: estuque sintético (E);

3ª letra = material de acabamento na face interna: massa látex PVA (L) massa de celulose (C) ou inexistente (X);

4ª letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis: banda acústica (B) ou inexistente (X).

A Figura 67 apresenta o gráfico onde são analisadas as massas de acabamento interno aplicadas sobre a chapa de gesso acartonado. O painel VELX com acabamento de massa acrílica látex aqueceu de 2°C na linha Li2 (centro do painel) enquanto que o painel VECX $4,1^\circ\text{C}$. A comparação da variação das temperaturas dos painéis VELX e VECX aponta a ineficiência da massa com fibras sintéticas e celulose que tem um caráter experimental e estava sendo testada pela indústria.

O ensaio mostrou-se útil para a avaliação preliminar do produto em desenvolvimento. Permite a avaliação prévia do produto auxiliando a pesquisa de materiais e seu desenvolvimento que posteriormente devem ser ensaiados em Instituições Técnicas Avaliadoras (ITAs).

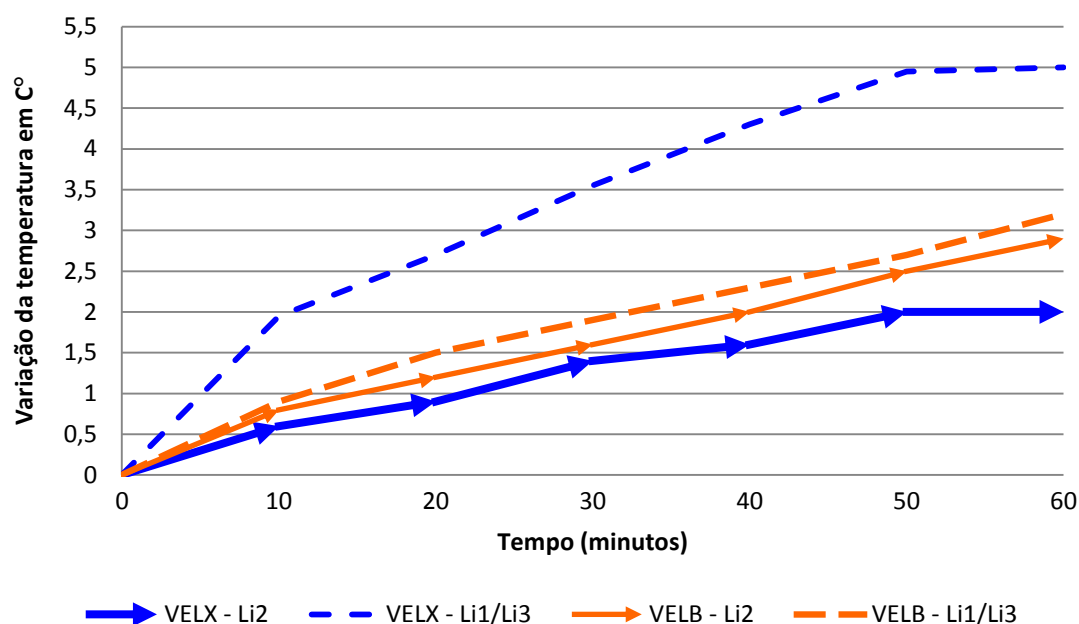


Figura 68: Variação de temperatura dos painéis para análise das tiras de ruptura térmica aplicadas sobre os perfis durante 60 minutos. Linhas Li2 (centro do painel) e Li1/Li3 (média das linhas sobre os perfis).
Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

1^o letra = material no miolo: (V) Lã de vidro;

2^o letra = material de acabamento na face externa: estuque sintético (E);

3^o letra = material de acabamento na face interna: massa látex PVA (L);

4^o letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis: banda acústica (B) ou inexistente (X).

A Figura 68 apresenta o gráfico com a análise de uma forma de mitigação da ponte térmica que acontece na região dos perfis metálicos. Ve-se pouca diferença de temperatura na linha central (Li2) do painel VELB e do painel VELX. Já nas linhas sobre os perfis (Li1/Li3) o painel VELX aqueceu 5 °C enquanto que o painel VELB aqueceu 3,2 °C. A colocação de tiras de 6 mm sobre os perfis na face externa obteve um resultado positivo, lembrando que, existe pontos na construção com grandes áreas metálicas, principalmente onde existe a necessidade de maior reforço na estrutura.

A diminuição da ponte térmica que acontece sobre os perfis é um objetivo do LSF em países como o Canadá, onde existe a necessidade de um maior isolamento por conta da temperatura externa ser muito baixa.

Atualmente países tecnologicamente desenvolvidos executam paredes de LSF, despreocupados com o custo dos materiais, já que a grande economia está na mão de obra de fabricação e execução. No Brasil, este quadro se inverte existindo a necessidade de economia de material. A utilização de resíduos para o preenchimento das paredes enquadra-se perfeitamente nessa realidade e acrescenta ao interior oco do LSF uma

visão mais sustentável. Analisando os resultados térmicos principalmente quando observa-se as implicações satisfatórias oriundas dos painéis com interior de resíduos, percebe-se que existe muita pesquisa a ser feita agregando um melhor custo e características de sustentabilidade ao interior das paredes.

4.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO

Com o experimento acústico obteve-se índices $D_{nT,w}$ (diferença padronizada de nível ponderada) que são apresentados na

Tabela 27 e podem ser comparados com os mínimos normativos (Tabela 26) que classifica os ruídos quanto a localização e em diferentes critérios de desempenho (mínimo, intermediário e superior).

Tabela 26: Diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa, $D_{2m,nT,w}$ para ensaios de campo. Fonte: Tabela F.9, pág 57 da NBR 15575-4, Tabela I.5 pág 56 da NBR 15575-5)

	Classe de ruído	Localização	Min	Int	Sup
Diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros de distância da fachada	I	hab. localizada distante de ruído intenso de qualquer natureza	$\geq 20\text{dB}$	$\geq 25\text{B}$	$\geq 30\text{dB}$
	II	hab. localizada em áreas sujeitas a situações de ruídos não enquadráveis nas classes I e III	$\geq 25\text{dB}$	$\geq 30\text{dB}$	$\geq 35\text{dB}$
	III	hab. sujeita ao ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas que estejam de acordo com a legislação	$\geq 30\text{dB}$	$\geq 35\text{dB}$	$\geq 40\text{dB}$

Nota. Valores em dB aproximados / ordem de grandeza para potencial atendimento na situação real de campo.

Tabela 27: Diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) para os painéis ensaiados. Fonte: Autor.

Diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$)	Valor (dB)
VELX	39
RELX	37
VECX	37
XXXX	36
XEXX	36
PELX	36
FELX	36
MELX	35

De um modo geral, todos os painéis obtiveram índices muito próximos. Estão enquadrados dentro do critério superior nas classes de ruído I e II, onde o índice

alcançado deve ser menor ou igual a 30 dB e 35 dB, respectivamente. Já para a classe de ruído III, os painéis são aceitos no critério intermediário, que indica um limite menor ou igual a 35 dB para habitações sujeitas ao ruído intenso.

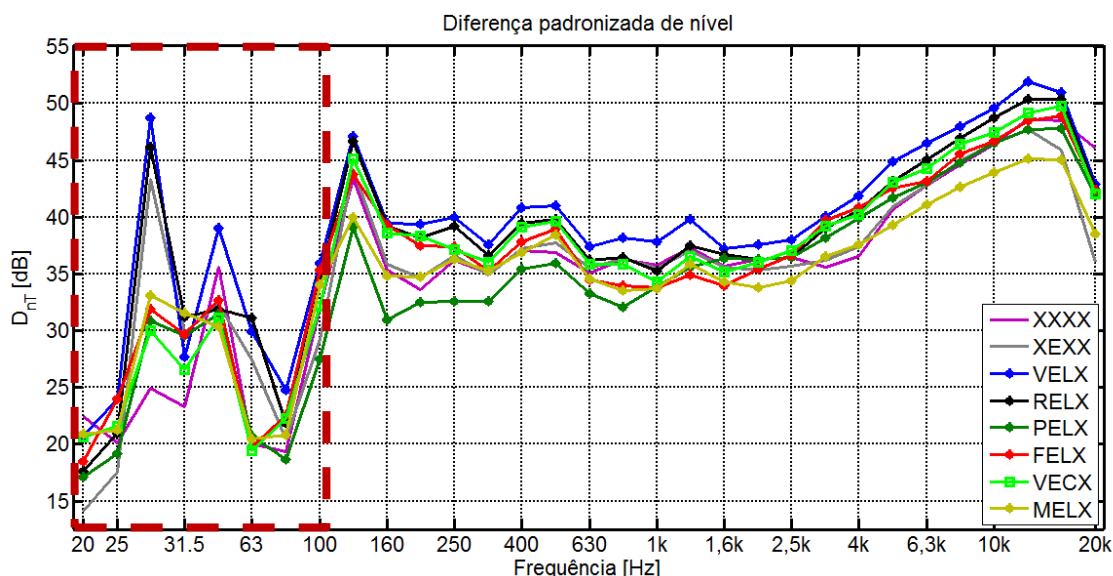


Figura 69: Gráfico geral com os resultados acústicos para as frequências de 20Hz a 20KHz para todos os painéis ensaiados. Fonte: Autor.

Nomenclatura dos painéis:

1º letra = 1º letra = material no interior do painel (V) Lã de vidro, (R) lã de rocha, (P) pedaços de gesso acartonado, (F) fibra cerâmica, (M) gesso moído ou (X) inexistente;

2º letra = material de acabamento na face externa: estuque sintético (E) ou inexistente (X);

3º letra = material de acabamento na face interna: massa látex PVA (L) ou inexistente (X);

4º letra = material para ruptura da ponte térmica sobre os perfis: banda acústica (B) ou inexistente (X).

A Figura 69 mostra os resultados do experimento acústico onde os painéis foram submetidos à frequências de 20 Hz a 20 kHz (por conta desta ser a faixa audível de uma pessoa jovem antes de ocorrer o envelhecimento dos ouvidos) e destaca as ordens de incerteza para as frequências 125 Hz, 500 Hz e 2KHz de cada painel.

Nota-se uma discrepância nos resultados entre as frequências de 20 Hz e 100 Hz diferente do que acontece entre as frequências de 100 Hz e 20 kHz. Os resultados para frequências muito baixas ou muito altas, próximas de 20 Hz e 20 kHz foram desconsideradas por conta de ruído de medição e mau desempenho do microfone (Figura 69). Lembrando que, quanto maior a frequência, expressa em ciclos por segundo (Hertz), mais agudo é o som e que as frequências de 20 até 100 Hz são consideradas baixas, de 100 Hz até aproximadamente 800 Hz médias e acima altas.

O gráfico geral (Figura 69) foi desmembrado e agrupado de forma a facilitar a análise dos resultados.

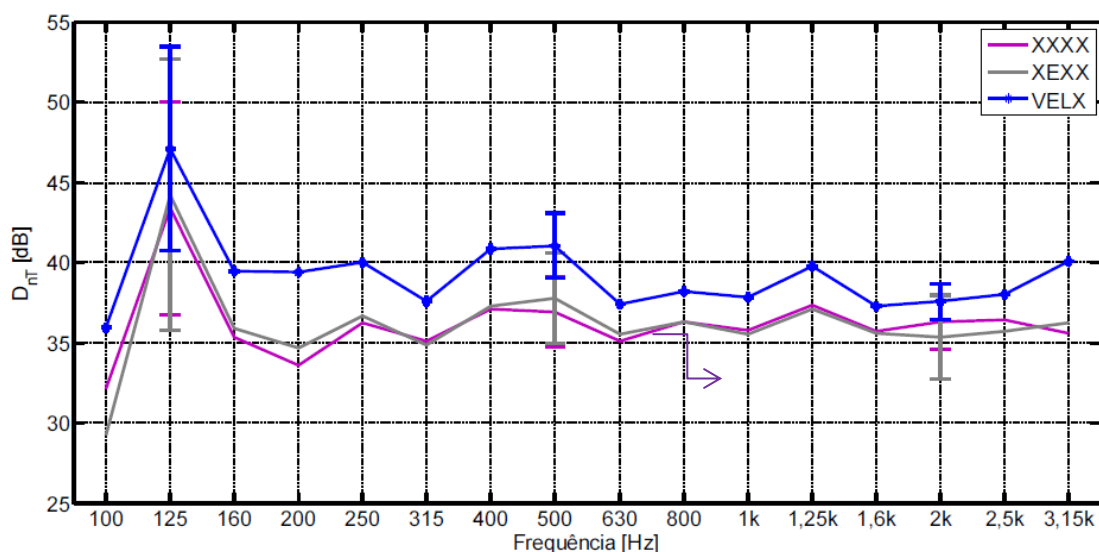


Figura 70: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis XXXX, XEXX E VELX. Fonte: Autor.

Na Figura 70 aparece o painel XXXX que não possui material isolante no interior nem acabamento sobre as chapas externas, o painel XEXX que acrescenta o estuque sintético como acabamento na face exterior e o painel VELX que possui 5 cm de lã de vidro e câmara de ar interna com 4 cm.

Nota-se nesse gráfico um comportamento acústico semelhante dos painéis XXXX e XEXX que possuem em seu interior uma câmara de ar com 9 cm e diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) de 36 dB. O painel VELX com $D_{nT,w}$ de 39dB possui desempenho acústico superior por dois motivos: o preenchimento da cavidade formada pelas chapas internas com material poroso diminui a influência dos modos acústicos na transmissão sonora em frequências muito baixas e absorve o som que se propagaria de um lado a outro (transformando energia sonora em calor).

Na Figura 71 é feita a análise dos painéis que possuem em seu interior materiais usualmente utilizados em construções de LSF no Brasil que são o VELX e o RELX que possuem no interior 5 cm lã de vidro e 7 cm de lã de rocha respectivamente e o painel FELX que possui 9 cm de fibra cerâmica em flocos (resíduo industrial) e que obteve o melhor desempenho térmico.

A diferença de tipologia entre os painéis pode ter influenciado na natureza dos resultados. O painel VELX e o RELX possuem em seu interior câmaras de ar com 4 cm e 2 cm, respectivamente enquanto que o painel FELX (com fibra cerâmica) teve toda a cavidade preenchida. O painel VELX possui o melhor isolamento sonoro, com diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) de 39dB e a lã de rocha 37dB. Como

ambos possuem tipologias semelhantes, então tem-se que a lã de vidro testada é melhor isolante que a lã de rocha.

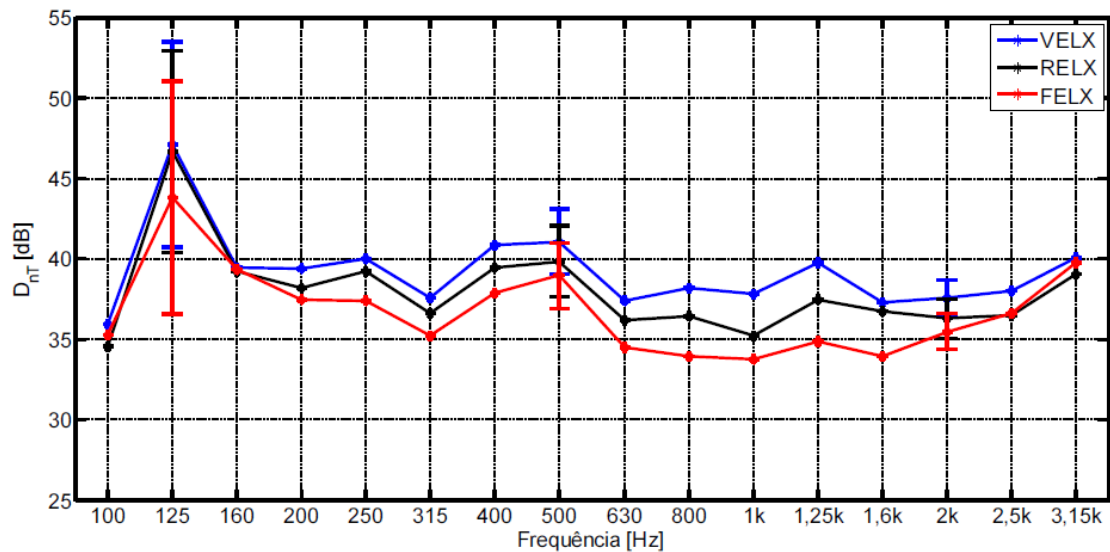


Figura 71: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis VELX, RELX E FELX. Fonte: Autor.

Observa-se que para o painel FELX a diferença padronizada de nível varia menos na faixa de frequência até 100 Hz (Figura 69) e que seu desempenho como elemento de isolamento sonoro começa a melhorar a partir dos 1,6 kHz, por conta da “Lei da Massa”. Percebe-se que o uso de paredes com câmara de ar interna é uma solução mais adequada quando se necessita de perda de transmissão sonora considerando que os três tipos de isolamento são fibrosos e porosos.

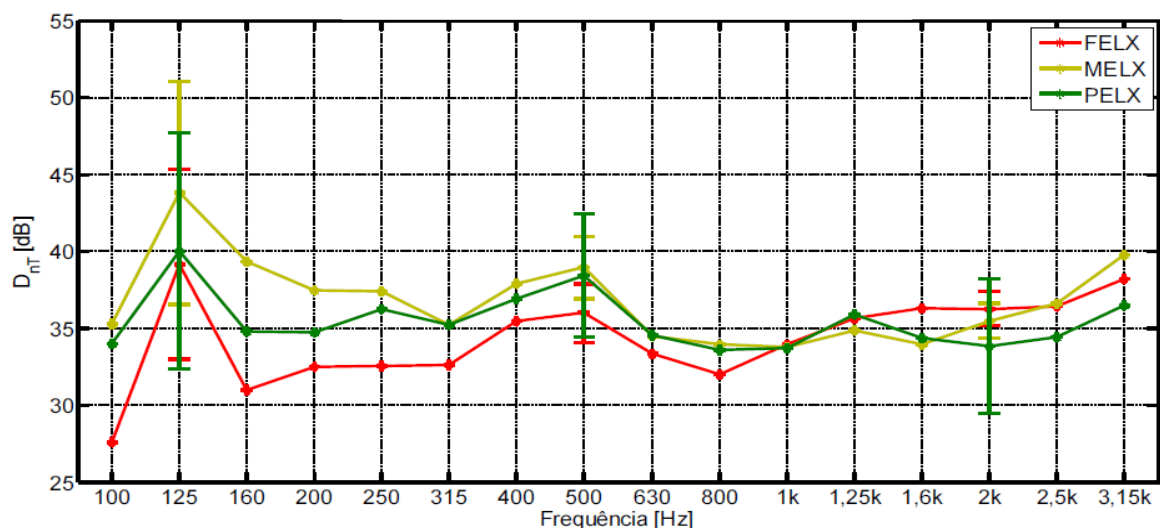


Figura 72: Diferença padronizada de nível com apresentação da faixa de incerteza da medição para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis FELX, MELX E PELX. Fonte: Autor.

A Figura 72 apresenta o desempenho acústico dos painéis que possuem em seu interior resíduo da indústria e da construção civil. Todos eles tiveram desempenho inferior quando comparados aos painéis preenchidos com as lãs industrializadas. O painel PELX é constituído de pedaços de gesso acartonado parafusados formando placas no interior do painel com uma câmara de ar de aproximadamente 6,5 cm. A forma de acomodação dos pedaços não garantiu a inexistência de frestas entre eles anulando o efeito positivo que a câmara de ar. Esta forma de preenchimento é a mais sustentável e a eliminação das frestas é um trabalho minucioso de instalação que exige a presença de selantes e inspeção. Com estes cuidados certamente obteríamos melhores resultados acústicos.

O painel VELX obteve o melhor desempenho atingindo 39 dB, enquanto que o painel MELX, que possui em seu interior gesso acartonado moído sem camada de ar, obteve o pior desempenho (35 dB) que ainda assim é alto quando comparado aos índices mínimos normativos para as três classes de ruídos. A camada de ar isola as faces da parede e dificulta a passagem do ruído, enquanto que nos painéis MELX e FELX o preenchimento total da cavidade cria um contato entre as faces facilitando a propagação de vibrações, de forma não previsível, o que tende a piorar o desempenho, além de dificultar a análise. A forma de encapsulamento do material possibilitando a existência de uma câmara de ar pode melhorar a performance dos materiais., que possui o interior preenchido completamente com o resíduo, facilita a passagem do som.

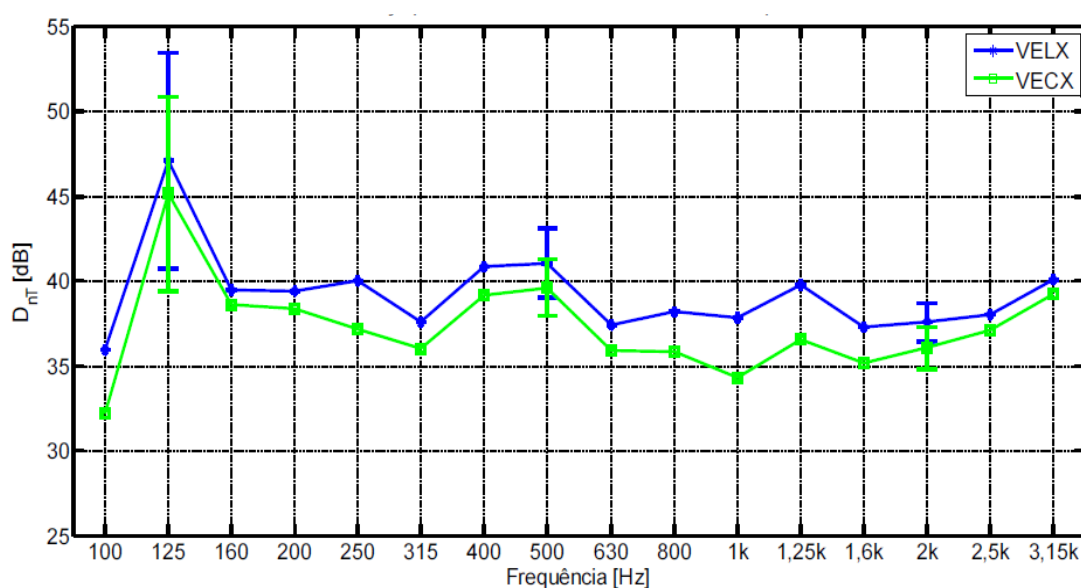


Figura 73: Diferença padronizada de nível com incerteza expandida para as frequências entre 100Hz e 3,15KHz. Painéis VELX E VECX. Fonte: Autor.

A Figura 73 apresenta o desempenho acústico dos painéis que possuem o interior com lã de vidro, estuque sintético na face externa e uma variação no acabamento da face interna onde foi testada uma massa que possui em sua composição fibras sintéticas e celulose (C). O desempenho é semelhante, com uma pequena vantagem para o VELX. Pode-se levantar a hipótese de que a camada de látex promove um amortecimento estrutural maior, o que contribui para que este painel tenha um melhor desempenho relativo ao isolamento sonoro.

4.4 ANÁLISE DE CUSTO DOS PAINÉIS

Para o cálculo do custo de cada painel, considerou-se o custo (material e mão de obra) do painel formado pelos componentes constantes que equivale ao painel XXXX (Tabela 28).

Tabela 28: Custo do painel XXXX por m². Fonte: Autor.

Insumos	Consumo	Unidade	Preço	Subtotal
Estrutura metálica LSF				
Mão de obra	2,16	m ²	R\$ 12,00	R\$ 25,92
Guia 90	3,6	ml	R\$ 10,26	R\$ 36,94
Montante 90	4,8	ml	R\$ 10,58	R\$ 50,78
Parafusos	16	unid.	R\$ 0,07	R\$ 1,12
			Subtotal	R\$ 114,76
Placa cimentícia + Membrana Hidrófuga				
Mão de obra	2,16	m ²	R\$ 18,00	R\$ 38,88
Membrana Hidrófuga	2,16	m ²	R\$ 2,85	R\$ 6,16
Placa cimentícia 12,5mm	2,16	m ²	R\$ 30,90	R\$ 66,74
Parafusos	42	unid.	R\$ 0,14	R\$ 5,88
			Subtotal	R\$ 117,66
Gesso acartonado				
Mão de obra	2,16	m ²	R\$ 12,00	R\$ 25,92
Placa de Gesso ST 12,5mm	2,16	m ²	R\$ 9,96	R\$ 21,51
Parafusos	42	unid.	R\$ 0,05	R\$ 2,10
			Subtotal	R\$ 49,53
VALOR TOTAL DE MONTAGEM DO PAINEL (2,16m²)				R\$ 281,95
TOTAL (m²)				R\$ 130,53

A Tabela 29 apresenta os custos dos materiais e mão de obra dos componentes que foram adicionados ao painel XXXX.

Tabela 29: Custos incorporados ao painel XXXX . Fonte: Autor.

Material	Unidade	Preços	
Estuque sintético			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Argamassa Externa (rendimento 3kg/m²)	kg	R\$	2,60
Tela de fibra de vidro Ar	m ²	R\$	2,25
TOTAL		R\$	7,85
Látex PVA			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Massa Látex PVA (rendimento 2kg/m²)	m ²	R\$	1,20
TOTAL		R\$	4,20
Painel Lã de vidro			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Lã de vidro - rolo	m ²	R\$	8,61
TOTAL		R\$	11,61
Lã de rocha			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Lã de rocha - rolo	m ²	R\$	14,02
TOTAL		R\$	17,02
Fibra cerâmica			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Fibra cerâmica (material e transporte por conta da indústria)	m ²	R\$	-
TOTAL		R\$	3,00
Pedaços de gesso acartonado			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Pedaços de gesso (descontado descarte e transporte)	m ²	R\$	4,30
TOTAL		R\$	- 1,30
Gesso moído			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Gesso moído (descontado descarte, transporte e moagem)	saldo	R\$	4,23
TOTAL		R\$	- 1,23
Massa com fibras sintéticas e celulose			
Mão de obra	m ²	R\$	3,00
Massa	m ²	R\$	1,70
TOTAL		R\$	4,70
Banda acústica			
Mão de obra	m ²	R\$	2,50
Banda acústica	ml	R\$	3,28
TOTAL		R\$	5,78

A Figura 74 apresenta o custo dos painéis por m² . Os painéis XXXX, XEXX não possuem isolamento no interior, nem massa látex PVA na face interna e consequentemente são os que obtêm menor valor. Os painéis PELX e MELX dentre todos os que possuem isolamento no interior são os de menor valor por conta do saldo positivo de reciclagem do gesso acartonado e são mais econômicos do que o painel

XELX que não possui preenchimento. O painel FELX possui um valor atrativo sendo também proveniente da reciclagem do resíduo.

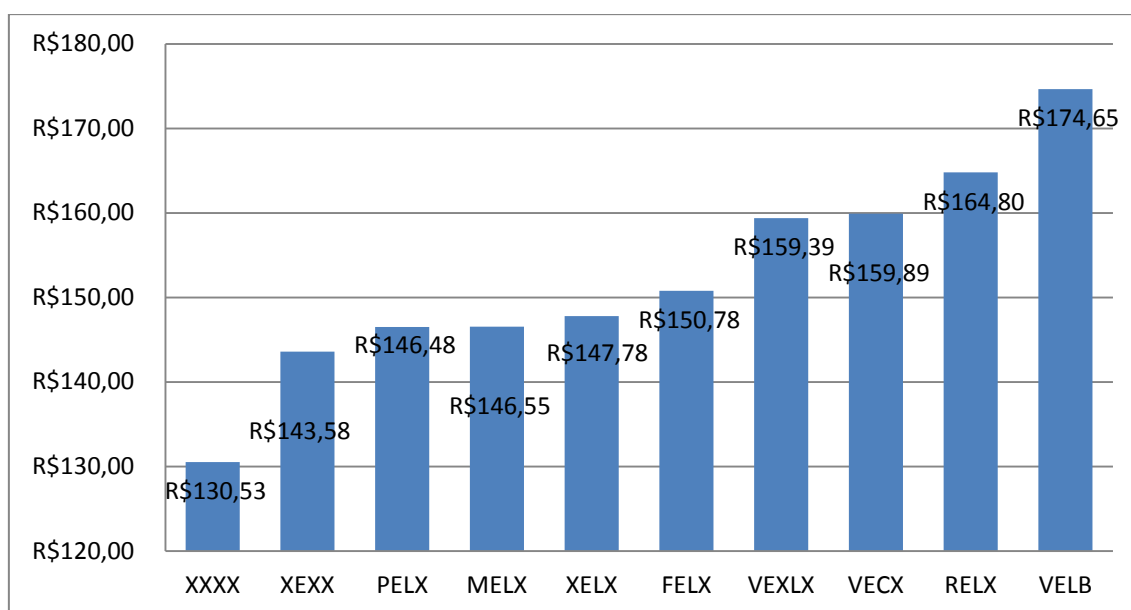


Figura 74: Gráfico com os custos dos painéis. Fonte: Autor.

Os painéis VELX, VECX e RELX são os que possuem em seu interior os materiais mais usualmente utilizados no Brasil e consequentemente os mais caros quando comparados aos painéis com preenchimento de material reciclado. O painel VELB é o único que possui a adição de um quarto elemento, que no caso é a banda acústica, consequentemente é o que possui maior valor por m².

O painel MELX com gesso acartonado moído em seu interior obteve um ótimo isolamento térmico quando comparado ao VELX preenchido com lã de vidro e é 12,47% mais econômico e ainda muito mais sustentável.

4.5 ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS PAINÉIS

Nessa dissertação além da análise dos resultados de desempenho segundo o desempenho térmico e acústico, foram elaborados três cenários que possuem prioridades distintas que questionam qual o melhor painel quando considera-se:

- Cenário 1: o desempenho térmico como prioridade;
- Cenário 2: o desempenho acústico de extrema importância; e
- Cenário 3: o menor custo como prioridade.

A forma e montagem da matriz hierárquica, assim como a obtenção dos pesos variáveis, encontram-se descritos no item 3.6, cabendo a este capítulo conclusivo somente o ranking dos painéis.

Tabela 30: Cenário 1 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.

Painéis	(%)	Ranking
FELX	66,24	1
VELX	61,38	2
MELX	58,30	3
VELB	56,05	4
RELX	53,57	5
VECX	52,33	6
PELX	44,52	7
XELX	28,80	8
XEXX	26,45	9
XXXX	2,93	10

Tabela 31: Cenário 2 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.

Painéis	(%)	Ranking
VELX	30,46	1
FELX	28,59	2
VELB	25,23	3
RELX	24,55	4
VECX	24,22	5
MELX	24,05	6
PELX	20,10	7
XELX	13,79	8
XEXX	13,01	9
XXXX	4,08	10

Tabela 32: Cenário 3 - Ranking dos painéis ensaiados segundo AHP. Fonte: Autor.

Painéis	(%)	Ranking
XXXX	20,44	1
MELX	18,26	2
FELX	17,65	3
PELX	17,48	4
XEXX	17,06	5
XELX	15,19	6
VELX	14,41	7
VECX	12,91	8
PELX	10,94	9
VELB	6,98	10

5 CONCLUSÕES

A análise dos resultados da dissertação permitiu conclusões acerca do desempenho dos painéis de vedação vertical externa executados em LSF, lembrando que o sistema de vedação pesquisado possui diversas formas de aplicação.

Pode-se afirmar que não existe uma relação entre as propriedades térmicas e acústicas dos painéis. Notoriamente o painel FELX que obteve o melhor desempenho térmico não possui o melhor desempenho acústico enquanto o painel VELX que alcançou o melhor índice acústico (39 dB) não obteve o melhor desempenho térmico.

Os painéis XXXX, XEXX e XELX obtiveram o mesmo desempenho acústico, e diferentes resultados térmicos. A variação térmica entre eles foi causada pelo acréscimo das massas de acabamento que explicitamente melhoraram seu desempenho térmico. Com relação aos resultados obtidos no experimento térmico em painéis com o interior oco, tem-se que o painel XXXX que não possui isolamento nem acabamento melhorou seu desempenho térmico em 69% com acréscimo do estuque sintético na face externa e da massa PVA látex na face interna, painel XELX.

Os resultados segundo o Procedimento 1 (Simplificado - normativo) foram obtidos através de cálculos e quando comparados aos índices sugeridos na NBR 15575 (ABNT, 2013) todos os painéis enquadraram-se dentro da limites para a transmitância máxima estipulada de $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Já no cálculo da capacidade térmica, os painéis XXXX, que não possui nenhum tipo de isolamento ou acabamento, e o painel XEXX, com estuque sintético, não atingiram o limite mínimo exigido de $130 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

O experimento apontou um melhor desempenho térmico nos painéis que possuem em seu interior resíduo de fibra cerâmica (reciclada da indústria) e gesso acartonado moído quando comparados às lâs industrializadas de vidro e de rocha. O painel FELX, que possui em seu interior fibra cerâmica, aqueceu $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e o painel MELX, que possui em seu interior gesso acartonado moído, aqueceu $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$. O painel VELX com lâ de vidro de 5 cm aqueceu $2 \text{ }^\circ\text{C}$ e o painel RELX com miolo de 7 cm de lâ de rocha aqueceu $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta comparação deve considerar que o gesso e a fibra ocuparam todo o vão com espessura de 9 cm, diferente das lâs que possuíam em seu interior uma câmara de ar, não sendo possível afirmar que as características físicas dos materiais sejam responsáveis pelos resultados. Independente disto é possível dizer que os materiais reciclados mostraram-se úteis e com vantagens ambientais e de custo às demais alternativas.

O experimento mostrou a ineficiência da massa com fibras e celulose aplicada como acabamento do gesso acartonado quando comparada a massa látex PVA aplicada na face interna. O painel VELX com lã de vidro no interior e massa látex PVA aqueceu 2 °C, enquanto que o painel VECX com a massa de fibra sintética e celulose 4,1 °C nas mesmas condições.

O experimento analisou a ponte térmica que acontece nos perfis comparando os resultados obtidos após o acréscimo da banda acústica de 6 mm sobre o painel que possui lã de vidro em seu interior. O painel sem as tiras aqueceu 3 °C, enquanto que o painel com as tiras 0,3 °C nas mesmas condições.

Para análise do desempenho acústico foi realizado um experimento que utilizou o Método de Transferência. De uma forma geral, o comportamento dos painéis em relação ao desempenho acústico é bastante semelhante. Os índices de diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$) dos painéis foram comparados com os limites acústicos sugeridos pela NBR 15575 (ABNT, 2015) e mostraram-se satisfatórios. Foram enquadrados no critério “superior” para as classes de ruído I e II que refere-se a habitações localizadas distante de ruído intenso de qualquer natureza e em áreas sujeitas a situações de ruídos não enquadráveis nas classes I e III e para a classe de ruído III que refere-se a habitações sujeitas ao ruído intenso, de meios de transporte e de outras naturezas, os painéis foram aceitos no critério “intermediário”.

Os painéis que possuem uma câmara de ar em seu interior obtiveram melhor desempenho acústico que aqueles com interior preenchido na sua totalidade, com exceção do painel PELX, que possui em seu interior pedaços de gesso parafusados entre si formando muitas frestas obtendo perda de transmissão de 36 dB, índice igual ao obtido pelos painéis XEXX, XXXX que não possuem isolamento em seu interior.

O painel MELX e o painel FELX que não possuem câmara de ar obtiveram uma perda de transmissão (PT) de 35 dB enquanto que painéis RELX e VECX, com lã de fibra de vidro, lã de rocha e câmara de ar, obtiveram PT de 37 dB.

Os resultados obtidos foram analisados pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP) que determinou qual é o melhor painel. Quando o desempenho térmico é considerado o critério de maior importância, o painel FELX com estuque sintético na face externa, massa látex PVA na parte interna e no miolo fibra cerâmica obteve o melhor desempenho. Quando o desempenho acústico é o critério mais relevante, o painel VELX, com lã de vidro no interior, obteve o melhor desempenho e quando o

critério de maior relevância é o custo, os painéis com interior preenchido com materiais reciclados, obtiveram o menor valor.

De um modo geral, os resultados positivos dos ensaios mostraram que é válida a iniciativa e que a pesquisa de resíduos da construção civil e da indústria para o preenchimento e que o interior oco, que é uma característica do sistema, podem auxiliar na evolução sustentável do LSF no Brasil. Despontou ainda que materiais utilizados largamente em outros sistemas e em outros detalhes construtivos podem facilitar e baratear a execução de detalhes e acabamentos, já que são largamente encontrados das lojas de construção civil, diferente dos produtos similares que são encontrados somente em grandes centros comerciais, em lojas especializadas na construção seca.

Pode-se afirmar que é possível e viável a utilização de métodos alternativos para a avaliação do desempenho de produtos ou sistemas quando se necessita de respostas comparativas, auxiliando na pesquisa de materiais inovadores. Um dos fatores bem conhecidos sobre o processo de desenvolvimento de produto é que o grau de incerteza no início deste procedimento é bem elevado, principalmente quando não se tem informações técnicas sobre o desempenho do material em questão. Pré-testes comparativos, feitos na fase inicial do processo, podem nortear a pesquisa e até auxiliar na especificação e detalhamento das soluções construtivas que envolvem a aplicação do produto antes de formalização das características de desempenho em uma ITA (Instituição Técnica Avaliadora) credenciada pela Secretaria Nacional de Habitação do Ministério das Cidades.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMUNDARAIN, A. **Assessment of the thermal efficiency, structure and fire resistance of lightweight building systems for optimized design.** Tese (PhD). The University Edimburg, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **B117-11: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog).** West Conshohocken. ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-1765: Standard practice for applying analytical hierarchy process (AHP) to multiattribute decision analysis of investments related to buildings and buildings systems.** ASTM, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização.** ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7008-1: Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente.** ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico – Procedimento.** Rio de Janeiro. Versão Corrigida. ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11358: Painéis termoisolantes à base de lã de vidro.** ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11360: Isolantes térmicos de lã de vidro - Flocos – Especificação.** Rio de Janeiro. ABNT, 1969.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11362: Feltros termoisolantes à base de lã de vidro.** ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11702: Tintas para construção civil – Tintas para edificações não industriais – Classificação.** ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12554: Tintas para edificações não industriais — Terminologia.** ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13531: Elaboração de projetos de edificações - Atividades técnicas.** ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14715: Chapas de gesso para drywall. Parte 1: Requisitos.** ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15312: Tintas para construção civil - Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais - Determinação da resistência à abrasão de massa niveladora.** ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15253: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais.** ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498: Placa de fibrocimento sem amianto — Requisitos e métodos de ensaio.** ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Desempenho de edificações Habitacionais.** ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15578: Bobinas e chapas de aço revestidas com liga 55% alumínio - Zinco pelo processo contínuo de imersão a quente – Especificação.** ABNT, 2014.

BATISTA, E. M. Development of Brazilian steel construction. **Journal of Constructional Steel Research**, Ed. Elsevier, v. 61, n. 61, p. 1009 - 1024, agosto / 2005.

BISTAFÁ, S.R. **Acústica aplicada ao controle de ruído – 2ª edição**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2011. 384 p.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** Fortaleza: Ed. Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. 308 p.

CARMODY, J.; WEBER, B. **Minnesota Green affordable Housing Guide.** Center for Sustainable Building Research of the University of Minnesota. Minneapolis (USA), 2007. Disponível em: <www.greenhousing.umn.edu>. Acesso em 28/11/2014.

CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA). **Sustentabilidade.** Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/>>. Acesso em: 09/05/2013.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO DO ESTADO DE SÃO PAULO (CDHU). **Relatório de Sustentabilidade de 2011.** São Paulo, setembro / 2012. Disponível em <<http://www.cdhu.sp.gov.br/home-new/Relatorio-de-Sustentabilidade-2011.pdf>>. Acesso em 26 de maio de 2014.

COLE, R. J. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. **Journal Building and Environment**. Ed. Elsevier, v. 34, p. 335-348, abril / 1998.

COLOMBO, C. R.; BAZZO, W. A. **Desperdício na Construção Civil e a Questão Habitacional: Um Enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade).** IV Jornada Latino-Americana de Estudos Sociais da Ciência e da Tecnologia (IV ESOCITE), p. 23-26. Campinas, 2000. Disponível em: <<http://www.oei.es/salactsi/colombobazzo.htm>>. Acesso em 02/02/2014.

CONAMA. **Resolução 448, de 18 de janeiro de 201e.** Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: Diário Oficial da União - Poder Executivo, 19 de janeiro de 2012.

CORBELLA, O; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental.** Rio de Janeiro: Ed. Revan, 2003. 287 p.

COYLE, G. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: Pearson Educational, 2004. 287 P.

CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: LSF**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2005.

CRASTO, M.R.; FREITAS, S.A.; SANTIAGO, K.A. **Steel framing: arquitetura**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, 2012.

DIETRICH, P. **Uncertainties in Acoustical Transfer Functions – Modeling, measurement and derivation of parameters for airborne and structure-borne sound**. Tese (Doutorado). Alemanha: RWTH Aachen/ITA, 2013.

DIRETRIZ SINAT Nº 003 - Revisão 01. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”)**. MINISTÉRIO DAS CIDADES, Secretaria Nacional da Habitação Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) e Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT). Brasília, 2012.

DIN 50018: **sulphur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere**. Berlin: Deurches Institut Fur Normung, 1997.

DRYWALL. **Resíduos de gesso na construção civil - coleta, armazenagem e reciclagem**. Associação Brasileira do Drywall. São Paulo: Agnds Gráfica e Editora, 2012.

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und Raumakustik in der Praxis - 2ª Ed**. Berlin: Ed. Verlag für Bauwesen, 2003. 422 p.

FEDERAL, Caixa Econômica. CEF. **Selo Casa Azul: Boas práticas para habitação mais sustentável. CE Federal**. São Paulo: Páginas e Letras–Editora e Gráfica, 2010.

FEDERAL, Caixa Econômica. CEF. **Demanda habitacional no Brasil**. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2011.

FEDERAL, Caixa Econômica. CEF. **Sistema Construtivo utilizando perfis estruturais formados a frio de aços galvanizados (steel framing): requisitos e condições mínimas para financiamento pela caixa**. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2013.

FLIR Instruments. Termovisores Flir. Disponível em: <<http://www.flir.com.br/instruments/display/?id=56911>>. Acesso em março de 2015.

FRECHETTE, L. A. **Building smarter with alternative materials**. 1999. Disponível em: <<http://www.build-smarter.com>>. Acesso em 14 maio de 2014.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico – 5ª edição**. São Paulo, Ed: Studio Nobel, 2001. 243 p.

GREVEN, H. A.; BALDAUF A. S. **Introdução à coordenação modular da construção no Brasil: uma abordagem atualizada**. Porto Alegre, ANTAC – Coleção Habitare 9, 2007.

GORGOLEWSKI, M. Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. **Building and Enviroment**. Ed. Elsevier, v. 42, issue 1, p. 230-236, dezembro / 2006.

HUBERMAN, N. PEARLMUTTER, D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. Science Direct. **Energy and Buildings**. Ed. Elsevier, v. 40, issue 5, p. 837-848, junho / 2008.

INCOTERM. **Soluções em medição**. Disponível em: <<http://www.incoterm.com.br/tecnica/7666+02+0+00+termo-higrometro+digital+temperatura+e+umidade+internas>>. Acesso em janeiro de 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10140: Laboratory measurement of sound insulation of building elements, 2010**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10077-2: Thermal performance of windows, doors and shutters -- Calculation of thermal transmittance -- Part 2: Numerical method for frames, 2012**.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18233: Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics, 2006**.

IZIDA, T. **A Produção do Aço Verde no Brasil**. Disponível em: <<http://www.uems.br/navirai/pesq/PGRN4d.html>>. Acesso em agosto de 2013.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2010. 362 p.

KNAUF. **Sistema de Fachada Knauf Aquapanel**. Disponível em: <<http://www.knauf.com.br/?id=249>>. Acesso em dezembro de 2014.

LAGUELA, S; GONZÁLEZ, J. H; ARMESTO, P.A. Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. **Infrared Physics & Technology**. Ed. Elsevier, Espanha, v. 54, issue 2, p. 92-99, março / 2011.

LAWSON, R. M; ODGEN, R.G. Hybrid light steel panel and modular systems. **Thin-Walled Structures**. Ed. Elsevier, v. 46, issues 7–9, p. 720–730, setembro / 2008.

LAWSON, R. M. **Light Steel Modular Construction**. Ascot: The Steel Construct Institute – SCI, 2012.

LISBOA, M. V. **Contribuição para tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados**. Tese (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MANDOLESI, E. **Edificación. El proceso de edificación, la edificación industrializada, la edificación del futuro**. Barcelona: Ed. CEAC, 1981.

MEDEIROS, J. S. **Tecnologias de vedação e revestimento para fachadas - Série Manual de Construção em Aço**. Rio de Janeiro: CBCA - Centro Brasileiro de Construção em Aço, 2014.

MESEGUER, A. G. Controle e garantia da qualidade na Construção. Tradução: Roberto Jose Falcão Bauer, Antonio Carmona Fº, Paulo Roberto do Lago Helene. São Paulo: Sinduscon – SP/ Projeto/ PW, 1991.

VOESTALPINE METSEC PLC (METSEC) . **SFS - Specification Manual**. Reino Unido, 2011. Catálogo.

MICHALKA Jr, C. A Inserção do Ambiente Construído no Ambiente Natural. In: Associação Fluminense de Ex - Bolsistas da Alemanha. (Org.). **Ambiente Construído. Reflexões sobre o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: Viveiro de Castro Editores Ltda., v. 1, p. 49-61, 2003.

MULLER, S., MASSARANI, P. Transfer Function Measurement with Sweeps. **Journal of the Audio engineering Society**. v. 49, issue 6, p. 443-471, junho / 2001.

MIRANDA, L.F.R.; ANGULO, C.A; CAREL. E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, janeiro – março / 2009.

NASFA. **The North American Steel Framing Alliance**. Disponível em: < www.steel framing.org/sfa_aboutsteelframing> . Acesso em maio de 2014.

NATIONAL GYPSUN. **Nacional Gypsum ThermalCORE**. Disponível em: <<http://www.thermalcore.info/ThermalCore.pdf>>. Acesso em 19 de dezembro de 2014.

PINHO, F. O. **Quando construir em aço - roteiro para escolha do sistema estrutural mais adequado**. São Paulo, Ed: Gerdau Açominas, 2009.

PIERRARD, J. F., AKKERMAN, D. **Manual Pro Acústica sobre a Norma de Desempenho. Guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da Norma ABNT NBR 15575:2013 -Edificações habitacionais - Desempenho**. São Paulo, 2013.

PRESTES, P.G.M. **Medição de isolamento sonoro pelo método da função de transferência**. 45 f. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

PROTOCOLO DE MONTREAL. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 1987.

PSQ DRYWALL. **Quem somos**. Disponível em <<http://www.qualidadedrywall.org.br/site/index.php?area=82&submenu=6>>. Acesso em 09/08/2014.

ROAF, S. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2006. 488 p.

ROCHA, J. D. O carvão vegetal no Brasil e a produção de aço verde. <http://www.cnepae.embrapa.br/>, Brasília-DF, p.1 - 2, 08/04/2011. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2011/o-carvao-vegetal-no-brasil-e-a-producao-de-aco-verde>>. Acesso em: 12/12/2013.

RODRIGUES, F. C. **Manual de Construção em Aço: Steel Framing - Engenharia**. Rio de Janeiro: Ed. Centro Brasileiro da Construção em aço (CBCA), 2006. 127 p.

ROSSO, T. **Racionalização construtiva**. Universidade de São Paulo: Ed. FAU-USP, 1980.

SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York : Ed. McGraw-Hill, 1980.

SANTIAGO, A. K. **O uso do sistema Light Steel Framing associado a outros sistemas construtivos como fechamento vertical externo não-estrutural**. Dissertação

(Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008. 153p.

SANTOS, P.; MARTINS, C.; SILVA, S. Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. **Metallurgical Research & Technology**. Ed: EDP Sciences, v. 111, issue 6, p. 329-338, setembro / 2014.

SCHAFER, B. W ; DIGIROLAMO; EILER, E. , FISHER, J.; LINDEMBERG, R.L.; MADSEN, M.; METTLER, T.H.; MILLER, T.H.; PEYTON, D. ; POLARD, G.; ROECKER, T. Roecker; ROGERS, C.; SHANMUGAN, N.E.; N.E.; WALKER, S.H. Accommodating Building Deflections: What every EOR should know about accommodating deflections in secondary cold-formed steel systems. **Structure magazine**. p. 16-18, abril / 2003.

SCHMITT, C. M.; FORMOSO, C. T.; MOLIN, D. D.; BONIN, L. C. **O desenvolvimento da qualidade e da produtividade da indústria da construção civil no Rio Grande do Sul**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (XII: 1992: São Paulo). Anais. São Paulo, SP: Universidade Paulista, 1992.

STEEL FRAMING ALLIANCE - SFA. **Fighting fire with steel fire resistance 101**. Washington – USA, 2003.

STEEL FRAMING ALLIANCE - SFA. **Thermal design and code compliance for cold-formed steel walls**. Washington – USA, 2008.

STEEL FRAMING ALLIANCE - SFA. **Steel and the environment**. Washington – USA, 2008.

STEEL FRAMING ALLIANCE - SFA. **A Guide to Fire & Acoustic Data for Cold-Formed Steel Floor, Wall & Roof Assemblies**. Washington – USA, 2013.

SILVA, D. T. **Estudo da Isolação Sonora em Paredes Divisórias de Diversas Naturezas**. 2000. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2000.

SILVA, E. L. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 - Série Manual de Construção em Aço**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008.

SHIN, K., HAMMOND, J. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. Chichester: Ed. John Wiley & Sons Ltda, 2008.

SOUZA, H. A. ; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 113-128, out. – dezembro/2011.

VELJKOVIC, M. JOHANSSON, B. Light steel framing for residential buildings. **Journal Thin-Walled Structures**. V. 44, p. 1272-1279, dezembro / 2006.

WAY, A.G.J.; COUCHMAN, G.H. **Acoustic Detailing for Steel Construction**. The Steel Construction Institute - SCI publication P372. Ascot, 2008.

WAY, A.G.J. **Acoustic Performance of Light Steel Construction**. The Steel Construct Institute - SCI. Ascot, 2012.